

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
SISTEMA DE ESTUDIO DE POSGRADO

ANÁLISIS DE SITIOS DE CONCENTRACIÓN DE CHOQUES VIALES MEDIANTE LA
UTILIZACIÓN DE SISTEMAS MÓVILES PARA EL INVENTARIO DE CARRETERAS EN
LA RUTA NACIONAL 1

Tesis sometida a la consideración de la Comisión del Programa de Estudios de Posgrado
en Ingeniería Civil para optar al grado y título de Maestría Académica en Ingeniería de
Transporte y Vías

ING. STEPHAN RODRÍGUEZ SHUM

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, Costa Rica

2019

Dedicatoria

A mí, por demostrarme que la adversidad se vence con esfuerzo y dedicación, que la soledad no es un enemigo y que la vida brinda compañeros y experiencias impensables.

Agradecimientos

A mi madre por apoyarme a través de la vida, a pesar de nuestras diferencias.

A María José por aprender de ingeniería solo con el fin de ayudarme durante este proceso y con gran paciencia y comprensión, acompañarme durante cada día y noche.

A Jonathan por guiarme en cada etapa, motivarme para seguir adelante y pacientemente prepararme para llegar a la meta.

A Diana y Javier por apoyarme durante mi vida profesional y gran parte de la académica, y guiarme a diario para ser un mejor ingeniero.

A la Unidad de Seguridad Vial y Transportes por colaborar en el acceso a los programas para la recolección de información y brindarme equipos de medición.

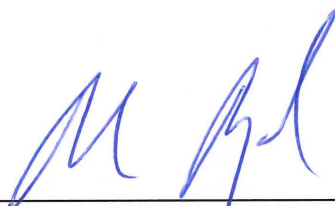
A Paul por ayudarme amablemente con mi aprendizaje en el uso de sistemas de información geográfica.

A Christian por pacientemente detallarme el uso del Geo3D y programa Trident.

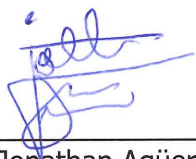
A la UGERVN por brindarme acceso a las bases de datos que complementaron el presente estudio.

A Robinson y Adriana por el apoyo y compañía incondicional durante este proceso.

"Esta tesis fue aceptada por la Comisión del Programa de Estudios de Posgrado en Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica, como requisito parcial para optar al grado y título de Maestría Académica en Ingeniería de Transporte y Vías."



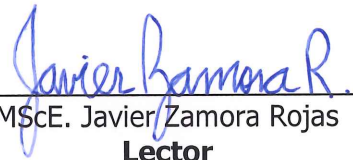
Ph.D. Rosendo Pujol Mesalles
**Representante del Decano
Sistema de Estudio de Posgrado**



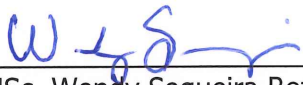
Ph.D. Jonathan Agüero Valverde
Profesor Guía



M.Sc. Diana Jiménez Romero
Lectora



MScE. Javier Zamora Rojas
Lector



MSc. Wendy Sequeira Rojas
**Representante
Programa de Posgrado en Ingeniería Civil**



Stephan Rodríguez Shum
Sustentante

Tabla de contenidos

Capítulo 1 .	Introducción	1
1.1	Justificación	1
1.1.1	Problema específico.....	1
1.1.2	Importancia	2
1.1.3	Antecedentes teóricos y prácticos del problema	3
1.2	Objetivos	6
1.2.1	Objetivo general.....	6
1.2.2	Objetivos específicos	7
1.3	Delimitación del problema	7
1.3.1	Alcances.....	7
1.3.2	Limitaciones.....	7
1.4	Metodología	9
1.4.1	Etapa 1: Caracterización de la infraestructura vial	10
1.4.2	Etapa 2: Recopilación de información de choques viales	10
1.4.3	Etapa 3: Medición de desempeño de la evaluación de la vía	10
1.4.4	Etapa 4: Propuesta de soluciones técnicas.....	11
Capítulo 2 .	Marco teórico.....	12
2.1	Identificación de sitios de concentración de choques viales.....	12
2.1.1	Frecuencia de choques	13
2.1.2	Tasa de choques	13
2.1.3	Tasa crítica de choques	14
2.1.4	Índice equivalente de solo daños a la propiedad (Índice EPDO).....	15
2.1.5	Teorema de Bayes.....	17
2.1.6	Exceso de frecuencia de choques esperado con ajuste de Bayes empírico ..	18
2.1.7	Exceso de frecuencia de choques esperado con ajuste de Bayes completo .	20

2.1.7.1	Criterio de bondad de ajuste	21
2.2	Equipo de inventario móvil.....	22
2.3	Medidas de mitigación.....	24
2.3.1	Canalización de movimientos en intersecciones o accesos.....	24
2.3.2	Ampliación del derecho de vía	24
2.3.3	Mejoras en márgenes de la vía	24
2.3.4	Sistemas de contención vehicular	25
2.3.5	Bandas rugosas en espaldón	25
2.3.6	Líneas o bandas reductoras de velocidad.....	25
2.3.7	Carriles de aceleración y desaceleración	26
2.3.8	Dispositivos delineadores	26
2.3.9	Dispositivos de iluminación.....	26
2.3.10	Cruces de fauna	26
Capítulo 3 .	Descripción de los datos	27
3.1	Choques viales	27
3.1.1	Clasificación de la vía.....	28
3.2	Caracterización de la infraestructura vial y flujos vehiculares	30
3.2.1	Recopilación de datos mediante equipo de inventario móvil	31
3.2.2	Análisis de variables	33
3.2.2.1	Tramos homogéneos.....	37
3.2.2.2	Tránsito promedio diario.....	37
3.2.2.3	Velocidad reglamentaria	38
3.2.2.4	Número de carriles.....	38
3.2.2.5	Ancho de carril	38
3.2.2.6	Zona libre disponible	39
3.2.2.7	Longitud de tramo homogéneo	40
3.2.2.8	Accesos o intercambios con flujo vehicular importante	40
3.2.2.9	Tasa de curvatura	41

3.2.2.10 Tasa de intersecciones por kilómetro	42
3.2.2.11 Deflectometría de impacto (FWD).....	42
3.2.2.12 Índice de regularidad internacional (IRI)	42
Capítulo 4 . Resultados	44
4.1 Frecuencia de choques.....	44
4.1.1 Choques totales	45
4.1.2 Choques equivalentes.....	45
4.2 Tasa de choques.....	46
4.2.1 Choques totales	46
4.2.2 Choques equivalentes.....	46
4.3 Tasa crítica de choques	47
4.3.1 Choques totales	47
4.3.2 Choques equivalentes.....	47
4.4 Índice EPDO.....	48
4.5 Modelo binomial negativo	48
4.5.1 Modelo binomial negativo del tramo 1 con choques totales	49
4.5.2 Modelo binomial negativo del tramo 1 con choques equivalentes.....	50
4.5.3 Modelo binomial negativo del tramo 2 con choques totales	50
4.5.4 Modelo binomial negativo del tramo 2 con choques equivalentes.....	51
4.5.5 Modelo binomial negativo del tramo 3 con choques totales	51
4.5.6 Modelo binomial negativo del tramo 3 con choques equivalentes.....	53
4.6 Exceso de frecuencia de choques esperado con ajuste de Bayes empírico.....	54
4.7 Exceso de frecuencia de choques esperado con ajuste de Bayes completo.....	57
4.7.1 Modelo del tramo 1 con choques totales.....	57
4.7.2 Modelo del tramo 1 con choques equivalentes	59
4.7.3 Modelo del tramo 2 con choques totales.....	61
4.7.4 Modelo del tramo 2 con choques equivalentes	63

4.7.5	Modelo del tramo 3 con choques totales.....	65
4.7.6	Modelo del tramo 3 con choques equivalentes	72
4.7.7	Comparación de modelos con choques totales y equivalentes	76
4.8	Comparación de métodos	83
4.8.1	Comparación Tramo 1	83
4.8.2	Comparación Tramo 2	86
4.8.3	Comparación Tramo 3	87
Capítulo 5 .	Diagnóstico y soluciones propuestas	92
5.1	Tramo 1: Autopista General Cañas	92
5.1.1	Segmento 5.....	93
5.1.2	Segmento 6.....	94
5.1.3	Segmento 7	95
5.2	Tramo 2: Autopista Bernardo Soto	96
5.2.1	Segmento 22	96
5.2.2	Segmento 27	97
5.2.3	Segmento 49	98
5.2.4	Segmento 59	99
5.2.5	Segmento 60	100
5.2.6	Segmento 78	101
5.2.7	Segmento 79	102
5.2.8	Segmento 86	102
5.3	Tramo 3: Carretera Interamericana Norte	104
5.3.1	Segmento 127	108
5.3.2	Segmento 134	108
5.3.3	Segmento 167	109
5.3.4	Segmento 172	110

5.3.5	Segmento 179	111
5.3.6	Segmento 184	112
5.3.7	Segmento 193	113
5.3.8	Segmento 204	114
5.3.9	Segmento 209	115
5.3.10	Segmento 213	116
5.3.11	Segmento 220	117
5.3.12	Segmento 235	117
5.3.13	Segmento 237	118
5.3.14	Segmento 240	119
5.3.15	Segmento 247	121
5.3.16	Segmento 258	121
5.3.17	Segmento 263	122
5.3.18	Segmento 269	123
5.3.19	Segmento 276	124
5.3.20	Segmento 280	125
5.3.21	Segmento 290	126
5.3.22	Segmento 295	127
5.3.23	Segmento 296	128
5.3.24	Segmento 297	128
5.3.25	Segmento 302	129
5.3.26	Segmento 307	131
5.3.27	Segmento 312	131
5.3.28	Segmento 318	132
Capítulo 6 .	Conclusiones y recomendaciones.....	134
6.1	Conclusiones	134

6.2	Recomendaciones.....	139
Capítulo 7 .	Referencias bibliográficas.....	143
Anexo		148

Índice de tablas

Tabla 3-1. Descripción de tramos de vía.....	28
Tabla 3-2. Estadística descriptiva de los choques viales en segmentos por tramo para el periodo 2012 – 2014.....	29
Tabla 3-3. Variables asociadas a la infraestructura vial y flujos vehiculares	31
Tabla 3-4. Estadística descriptiva de variables analizadas para el tramo 1	33
Tabla 3-5. Estadística descriptiva de variables analizadas para el tramo 2	34
Tabla 3-6. Estadística descriptiva de variables analizadas para el tramo 3	34
Tabla 3-7. Estadística descriptiva de variables analizadas para toda la ruta	35
Tabla 3-8. Resumen de variables categorizadas para el tramo 1.....	35
Tabla 3-9. Resumen de variables categorizadas para el tramo 2.....	36
Tabla 3-10. Resumen de variables categorizadas para el tramo 3.....	36
Tabla 3-11. Resumen de variables categorizadas para toda la ruta	37
Tabla 4-1. Resumen de resultados: Frecuencia de choques con choques totales.....	45
Tabla 4-2. Resumen de resultados: Frecuencia de choques con choques equivalentes	45
Tabla 4-3. Resumen de resultados: Tasa de choques con choques totales	46
Tabla 4-4. Resumen de resultados: Tasa de choques con choques equivalentes	46
Tabla 4-5. Resumen de resultados: Tasa crítica de choques con choques totales.....	47
Tabla 4-6. Resumen de resultados: Tasa crítica de choques con choques equivalentes ...	47
Tabla 4-7. Resumen de resultados: Índice equivalente de solo daños a la propiedad	48
Tabla 4-8. Modelo binomial negativo de choques totales para el tramo 1	49
Tabla 4-9. Modelo binomial negativo de choques equivalentes para el tramo 1.....	50
Tabla 4-10. Modelo binomial negativo de choques totales para el tramo 2	50
Tabla 4-11. Modelo binomial negativo de choques equivalentes para el tramo 2.....	51
Tabla 4-12. Modelo binomial negativo de choques totales para el tramo 3	52
Tabla 4-13. Modelo binomial negativo de choques equivalentes para el tramo 3.....	53
Tabla 4-14. Comparación de segmentos críticos con exceso de frecuencia de choques esperado con ajuste de Bayes empírico por tramo	54
Tabla 4-15. Jerarquización de segmentos según exceso de frecuencia del tramo 1, obtenidos con el método de exceso de frecuencia de choques esperado con ajuste de Bayes empírico.....	55

Tabla 4-16. Jerarquización de segmentos según exceso de frecuencia del tramo 2, obtenidos con el método de exceso de frecuencia de choques esperado con ajuste de Bayes empírico.....	55
Tabla 4-17. Jerarquización de segmentos según exceso de frecuencia del tramo 3, obtenidos con el método de exceso de frecuencia de choques esperado con ajuste de Bayes empírico.....	56
Tabla 4-18. Modelo de exceso de frecuencia de choques esperados con ajuste de Bayes completo con choques totales para el tramo 1.....	59
Tabla 4-19. Modelo de exceso de frecuencia de choques esperados con ajuste de Bayes completo con choques equivalentes para el tramo 1	60
Tabla 4-20. Modelo de exceso de frecuencia de choques esperados con ajuste de Bayes completo con choques totales para el tramo 2.....	63
Tabla 4-21. Modelo de exceso de frecuencia de choques esperados con ajuste de Bayes completo con choques equivalentes para el tramo 2	65
Tabla 4-22. Modelo de exceso de frecuencia de choques esperados con ajuste de Bayes completo con choques totales para el tramo 3.....	72
Tabla 4-23. Modelo de exceso de frecuencia de choques esperados con ajuste de Bayes completo con choques equivalentes para el tramo 3	76
Tabla 4-24. Comparación de segmentos críticos con exceso de frecuencia de choques esperado con ajuste de Bayes completo por tramo	76
Tabla 4-25. Jerarquización de segmentos según exceso de frecuencia del tramo 1, obtenidos con el método de exceso de frecuencia de choques esperado con ajuste de Bayes completo con choques totales	78
Tabla 4-26. Jerarquización de segmentos según exceso de frecuencia del tramo 1, obtenidos con el método de exceso de frecuencia de choques esperado con ajuste de Bayes completo con choques equivalentes.....	79
Tabla 4-27. Jerarquización de segmentos según exceso de frecuencia del tramo 2, obtenidos con el método de exceso de frecuencia de choques esperado con ajuste de Bayes completo con choques totales	80
Tabla 4-28. Jerarquización de segmentos según exceso de frecuencia del tramo 2, obtenidos con el método de exceso de frecuencia de choques esperado con ajuste de Bayes completo con choques equivalentes.....	80

Tabla 4-29. Jerarquización de segmentos según exceso de frecuencia del tramo 3, obtenidos con el método de exceso de frecuencia de choques esperado con ajuste de Bayes completo con choques totales	81
Tabla 4-30. Jerarquización de segmentos según exceso de frecuencia del tramo 3, obtenidos con el método de exceso de frecuencia de choques esperado con ajuste de Bayes completo con choques equivalentes.....	82
Tabla 4-31. Comparación de métodos para caso con choques totales en el tramo 1.....	84
Tabla 4-32. Comparación de métodos para caso con choques equivalentes en el tramo 185	
Tabla 4-33. Comparación de métodos para caso con choques totales en el tramo 2.....	86
Tabla 4-34. Comparación de métodos para caso con choques equivalentes en el tramo 287	
Tabla 4-35. Comparación de métodos para caso con choques totales en el tramo 3.....	88
Tabla 4-36. Comparación de métodos para caso con choques equivalentes en el tramo 390	

Índice de figuras

Figura 1-1. Esquema metodológico.....	9
Figura 2-1. Equipo Trident 3D modelo MX-1	22
Figura 2-2. Visualización de 6 cámaras para auscultación visual	23
Figura 3-1. Categorización de las zonas libres disponibles.....	40
Figura 3-2. Tramos homogéneos categorizados por tasa de curvatura	41
Figura 4-1. Variación de la frecuencia de choques esperado por km con respecto al TPD, basado en modelo bayesiano completo con choques totales del tramo 1	58
Figura 4-2. Variación de la frecuencia de choques esperado por km con respecto al TPD, basado en modelo bayesiano completo con choques equivalentes del tramo 1	60
Figura 4-3. Variación de la frecuencia de choques esperado por km con respecto al TPD, basado en modelo bayesiano completo con choques totales del tramo 2	61
Figura 4-4. Variación de la frecuencia de choques esperado por km con respecto a la velocidad reglamentaria, basado en modelo bayesiano completo con choques totales del tramo 2.....	62
Figura 4-5. Variación de la frecuencia de choques esperado por km con respecto al TPD, basado en modelo bayesiano completo con choques equivalentes del tramo 2	64
Figura 4-6. Variación de la frecuencia de choques esperado por km con respecto a la velocidad reglamentaria, basado en modelo bayesiano completo con choques equivalentes del tramo 2	65
Figura 4-7. Variación de la frecuencia de choques esperado por km con respecto al TPD, basado en modelo bayesiano completo con choques totales del tramo 3	66
Figura 4-8. Variación de la frecuencia de choques esperado por km con respecto al ancho de carril, basado en modelo bayesiano completo con choques totales del tramo 3.....	67
Figura 4-9. Variación de exposición al riesgo con respecto al ancho de carril, basado en modelo bayesiano completo con choques totales del tramo 3	67
Figura 4-10. Variación de la frecuencia de choques esperado por km con respecto a la tasa de curvatura, basado en modelo bayesiano completo con choques totales del tramo 3 ...	69
Figura 4-11. Variación de exposición al riesgo con respecto a la tasa de curvatura, basado en modelo bayesiano completo con choques totales del tramo 3.....	69
Figura 4-12. Variación de la frecuencia de choques esperado por km con respecto a la FWDprom, basado en modelo bayesiano completo con choques totales del tramo 3	70

Figura 4-13. Variación de la frecuencia de choques esperado por km con respecto a la zona libre disponible, basado en modelo bayesiano completo con choques totales del tramo 3	71
Figura 4-14. Variación de la frecuencia de choques esperado por km con respecto al TPD, basado en modelo bayesiano completo con choques equivalentes del tramo 3	73
Figura 4-15. Variación de la frecuencia de choques esperado por km con respecto a la tasa de curvatura, basado en modelo bayesiano completo con choques equivalentes del tramo 3	74
Figura 4-16. Variación de exposición al riesgo con respecto a la tasa de curvatura, basado en modelo bayesiano completo con choques equivalentes del tramo 3	74
Figura 4-17. Variación de la frecuencia de choques esperado por km con respecto a la zona libre disponible, basado en modelo bayesiano completo con choques equivalentes del tramo 3	75
Figura 5-1. Segmentos críticos Tramo 1	92
Figura 5-2. Segmentos críticos Tramo 2	96
Figura 5-3. Segmentos críticos Tramo 3-1	104
Figura 5-4. Segmentos críticos Tramo 3-2	105
Figura 5-5. Sistema de contención semirrígido anclado en concreto.....	106
Figura 5-6. Sistema de contención rígido en mediana con interrupción en su sección por luminaria.....	106
Figura 5-7. Sección de sistema de contención rígido para mediana con diseño apropiado para incorporar luminaria.....	107

Resumen

La Ruta Nacional 1 conecta 5 de las 7 provincias de Costa Rica, por lo que representa una de las rutas más importantes del país y la región. Adicionalmente, presenta el tránsito diario anual más alto del país, con un valor cercano a los 105000 vehículos/día y, según estudios de accidentabilidad, está catalogada como ruta de alto riesgo.

Por ello la importancia del presente estudio, donde se determinaron los sitios de concentración de choques viales en segmentos mediante el método de exceso de frecuencia de choques esperado con ajuste de Bayes completo con un modelo Poisson Log Normal, basado en los datos de choques viales del Consejo de Seguridad Vial (COSEVI) del periodo 2012 - 2014.

Las variables dependientes fueron de tipo geométrico, operativas y funcionales del tránsito, así como características estructurales y funcionales de la estructura de pavimento obtenidas mediante el sistema móvil para el inventario de carreteras del Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR) y bases de datos externas.

Los modelos permitieron identificar el efecto del índice de regularidad internacional (IRI) y la deflectometría de impacto (FWD) en la accidentabilidad, donde resultaron significativas para un nivel de confianza del 95%.

Aumentos en el IRI están correlacionados con el incremento en la frecuencia de choques/km, con una tendencia al alza del 15,03% por unidad de m/km. Mientras que aumentos en el FWD están correlacionados con disminuciones en el número esperado de choques, condición que se interpretó como un efecto colateral del confort y la velocidad de operación.

El uso del sistema de inventario móvil permitió generar el primer modelo en Costa Rica que incorporara la variable ancho de carril, parámetro que, al analizar la frecuencia de choques/km esperados, evidenció un aumento en la exposición al riesgo de 39,12% al utilizar anchos de carril de 3,2 m – 3,5 m, con respecto a un ancho de carril en el rango de 3,5 m – 3,7 m.

De forma complementaria al ajuste de Bayes completo, se implementaron los métodos frecuencia de choques, tasa de choques, tasa crítica de choques, frecuencia promedio para choques equivalentes a solo daños de propiedad y exceso de frecuencia de choques esperados con el ajuste de Bayes empírico con choques totales y equivalentes. Al utilizar el modelo de Bayes completo con choques equivalentes como modelo de referencia, se confirmó que ninguno de los métodos alternos permitió jerarquizar correctamente ni identificar los segmentos con mayor posibilidad de mejora o mayor exceso de frecuencia, por lo que se recomienda utilizar el método de exceso de frecuencia de choques esperado con ajuste de Bayes completo con choques equivalentes en Costa Rica.

Posterior a la identificación de los sitios con mayor frecuencia de choques viales, se propusieron medidas generales que permitirán reducir la severidad y ocurrencia de los siniestros viales, en función de visitas de campo y los registros de choques viales.

Palabras clave: Ruta Nacional 1, exceso de frecuencia de choques, Bayes completo, Poisson Log Normal, seguridad vial

Abstract

The National Road 1 is one of the most important highways on Costa Rica and the Central American region, because it connects 5 of the 7 provinces of Costa Rica. Additionally, it possesses the highest annual daily traffic of Costa Rica, with a traffic flow near 105000 vehicles per day, and based on road safety studies, is classified as a high risk road.

This project used a Poisson Log Normal Full Bayesian model approach to estimate the expected average crash frequency for road segments, based on the crash reports data of the Road Safety Council (COSEVI) from 2012 to 2014.

The covariates used were related to road geometry, operational aspects of traffic, and functional and structural characteristics of the pavement structure, obtained through the mobile road survey system of the National Laboratory of Materials and Structural Models (LanammeUCR) and external data bases.

The models identified, with a 95% of statistical significance, the effect on road safety of the International Regularity Index (IRI) and the Falling Weight Deflectometry (FWD).

Higher IRI values are related to an increase of the crash frequency per kilometer, with a constant tendency of 15,03% per unit of m/km. Opposed to the IRI tendencies, the FWD generates an inversely proportional behavior regarding crash frequency.

Mobile road survey system allowed to incorporate for the first time in Costa Rica the lane width variable to a model, which resulted significant. When the expected crash frequency per kilometer was analyzed, it showed an increasing risk tendency of 39,12% with 3.2 m to 3.5 m-wide lanes, compared to lane widths between 3,5 m – 3,7 m.

As a complementary analysis to the Full Bayes approach, the methods accident frequency, accident rate, critical accident rate, equivalent property damage only index, and Empirical Bayes were used with total crash data and equivalent crash data. Considering Full Bayes with equivalent crash data as the base reference, it was confirmed that none of the other methods were able to rank or identify the road segments with the highest potential for safety improvement or expected crash frequency. It is therefore recommended to use Full Bayes Method to estimate expected crash frequency in Costa Rica.

After the high-priority locations were identified, general safety improvements were proposed to reduce the amount and severity of road crashes, based on site inspections and crash report data.

Key words: National Road 1, black spots, Full Bayes, Poisson Log Normal, Road Safety



Autorización para digitalización y comunicación pública de Trabajos Finales de Graduación del Sistema de Estudios de Posgrado en el Repositorio Institucional de la Universidad de Costa Rica.

Yo, Stephan Rodríguez Shum, con cédula de identidad 7-0192-0584, en mi condición de autor del TFG titulado Análisis de sitios de concentración de choques viales mediante la utilización de sistemas móviles para el inventario de carreteras en la Ruta Nacional 1

Autorizo a la Universidad de Costa Rica para digitalizar y hacer divulgación pública de forma gratuita de dicho TFG a través del Repositorio Institucional u otro medio electrónico, para ser puesto a disposición del público según lo que establezca el Sistema de Estudios de Posgrado. SI ☒ NO * ☐

*En caso de la negativa favor indicar el tiempo de restricción: _____ año (s).

Este Trabajo Final de Graduación será publicado en formato PDF, o en el formato que en el momento se establezca, de tal forma que el acceso al mismo sea libre, con el fin de permitir la consulta e impresión, pero no su modificación.

Manifiesto que mi Trabajo Final de Graduación fue debidamente subido al sistema digital Kerwá y su contenido corresponde al documento original que sirvió para la obtención de mi título, y que su información no infringe ni violenta ningún derecho a terceros. El TFG además cuenta con el visto bueno de mi Director (a) de Tesis o Tutor (a) y cumplió con lo establecido en la revisión del Formato por parte del Sistema de Estudios de Posgrado.

INFORMACIÓN DEL ESTUDIANTE:

Nombre Completo: Stephan Rodríguez Shum

Número de Carné: A75527 Número de cédula: 7-0192-0584

Correo Electrónico: stephanshum@gmail.com

Fecha: 2/10/19 Número de teléfono: 8819-4394

Nombre del Director (a) de Tesis o Tutor (a): Jonathan Agüero Valverde

FIRMA ESTUDIANTE

Nota: El presente documento constituye una declaración jurada, cuyos alcances aseguran a la Universidad, que su contenido sea tomado como cierto. Su importancia radica en que permite abreviar procedimientos administrativos, y al mismo tiempo genera una responsabilidad legal para que quien declare contrario a la verdad de lo que manifiesta, puede como consecuencia, enfrentar un proceso penal por delito de perjurio, tipificado en el artículo 318 de nuestro Código Penal. Lo anterior implica que el estudiante se vea forzado a realizar su mayor esfuerzo para que no sólo incluya información veraz en la Licencia de Publicación, sino que también realice diligentemente la gestión de subir el documento correcto en la plataforma digital Kerwá.

Capítulo 1 . Introducción

1.1 Justificación

1.1.1 Problema específico

La Ruta Nacional 1 se encuentra comprendida por la autopista General Cañas, autopista Bernardo Soto y la carretera Interamericana Norte, para un total de 289,6 km que permiten conectar las provincias de San José, Alajuela, Heredia, Puntarenas y Guanacaste, por lo que representa una de las rutas más importantes del país.

A pesar de la importancia a nivel nacional de la ruta, son escasos los estudios en materia de seguridad vial existentes, agravado por el alto tránsito de algunos sectores, una geometría rectilínea en algunas secciones que fomenta altas velocidades de conducción y accesos sin transiciones apropiadas. Como agravante principal, la vía cuenta con tramos que atraviesan asentamientos poblacionales importantes, donde peatones, ciclistas y vehículos automotores comparten el espacio sin infraestructura apropiada para ello y de forma recurrente, los usuarios más vulnerables deben cruzar la Ruta Nacional 1, condiciones que propician la ocurrencia de choques viales.

Barrantes y Sanabria (2011) identificaron que el agarre superficial de la Ruta Nacional 1 presenta en 47,2% de su extensión una clasificación regular, considerada como deslizante y peligrosa, y 20,7% de la vía en condiciones malas, considerada como muy deslizante y muy peligrosa. También un 83,63% de la vía presenta una clasificación mala en cuanto a retrorreflectividad de la línea centro y para el caso de la línea borde un 59,22%.

Complementario a los riesgos evidenciados a nivel de fricción y retrorreflectividad, Agüero (2016) jerarquizó las rutas nacionales según su potencial de mejora, basado en funciones de desempeño de seguridad vial con el ajuste de Bayes Empírico para Costa Rica. En este estudio identificó la Ruta Nacional 1 como la 4^{ta} con mayor exceso de choques basado en el registro de datos del 2010 – 2013.

Las variables descritas tienen repercusiones en la seguridad vial de los usuarios, directamente sobre la frecuencia y la gravedad de los choques, motivo por el cual este proyecto determinó los sitios de concentración de choques viales en la Ruta Nacional 1, así

como medidas de mitigación que permitan reducir tanto la frecuencia como la severidad de los choques.

1.1.2 Importancia

Según el Reporte del estado de la seguridad vial en el mundo de la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2018a), se estima que 1,35 millones de personas fallecen por causas relacionadas a un accidente de tránsito por año. Esta cifra equivale a 3700 defunciones diarias y los usuarios de mayor vulnerabilidad, como lo son los peatones, representan más del 50% de las defunciones. Adicionalmente, entre 20-50 millones de personas presentan traumatismos o efectos secundarios, incurriendo en un aumento de discapacidad en el mundo.

Si se toma en consideración que, en países de ingreso bajos o medianos, dentro de los que se encuentra Costa Rica, se genera el 93% de las defunciones anuales mundiales a causa de choques viales (OMS, 2018b), es de vital importancia conocer los puntos de concentración de choques viales e intervenirlos.

Para fundamentar la presencia de la problemática en Costa Rica, el Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC) de Costa Rica identificó que la causa principal de defunciones durante el periodo 2000-2017, para el rango de edades de 14 a 44 años, fue la clasificación de "Personas lesionadas en choques de tránsito, de vehículo de motor" (INEC, 2018), lo que indica que los choques viales representan un riesgo elevado para la población en desarrollo y activa laboralmente del país, capital humano que debe protegerse para el desarrollo nacional.

Ante la problemática de accidentabilidad vial, el Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT) en colaboración con el Consejo de Seguridad Vial (COSEVI) desarrolló el "Plan Estratégico Nacional de Seguridad Vial, 2007-2011" donde plantean políticas nacionales de seguridad vial que debían implementarse.

Dentro de las políticas planteadas se encuentra la "Identificación y atención de tramos de carretera de alto riesgo en la ocurrencia de choques de tránsito (puntos negros), para fortalecer el control y vigilancia por medio de la programación de planes de intervención", herramienta que de aplicarse permitiría determinar la priorización de tramos y rutas por intervenir en materia de seguridad vial.

Adicionalmente, en el 2014 el COSEVI publica su “Estrategia para la implementación de medidas en seguridad vial en espacios de incidencia de choques de tránsito: una priorización de la atención”. En el documento indican medidas globales que deben implementarse para reducir la severidad y accidentabilidad, se indica en el documento la aspiración de reducir el número de personas fallecidas por choques de tránsito en un 50%, para lo que es de vital importancia identificar los puntos de concentración de choques a intervenir mediante metodologías adecuadas.

En materia de identificación de sitios de concentración de choques viales, el estado del arte en metodologías radica en el ajuste de Bayes Completo y en recolección de inventarios de infraestructura vial destacan los sistemas móviles para el inventario de carreteras, por lo que la intención global de la investigación se enfoca en valorar la practicidad de converger ambas tendencias para agilizar la recolección de datos y mejorar la calidad tanto de la información como de las estimaciones relacionadas a los sitios por intervenir.

1.1.3 Antecedentes teóricos y prácticos del problema

Se procede a presentar las principales fuentes bibliográficas en materia de seguridad vial que anteceden a la investigación en cuestión, cabe destacar que para Costa Rica en su mayoría los estudios de esta índole son generados como Trabajos Finales de Graduación por estudiantes de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica, por el PITRA- LanammeUCR y el Programa de Investigación en Desarrollo Urbano Sostenible (ProDUS).

En el estudio realizado por Barrantes y Sanabria (2011) titulado Evaluación de la Red Vial Nacional Pavimentada de Costa Rica: Identificación de zonas de riesgo de choques Rutas 1, 2, 32 y 34, se evaluaron las variables: terreno, alineamiento, variables climáticas, coeficiente de rozamiento de superficie y retrorreflectividad de la demarcación de las Rutas Nacionales 1, 2, 32 y 34; estudio que da indicios de la relación entre variables asociadas al clima, geometría y estado de los materiales de la vía en la seguridad vial.

Asociado a la identificación específica de sitios de concentración de choques viales en Costa Rica resaltan trabajos finales de graduación (TFG) de la Universidad de Costa Rica, dentro de los cuales se encuentran:

Específicamente en la Ruta Nacional 1 se realizó el TFG titulado Propuesta para una metodología de análisis de tramos con concentración de choques en las Rutas Nacionales, con base en estudio realizado en la Ruta 1, realizado por Ramírez (2010). En el estudio se aplicaron diversos métodos para identificar tramos de concentración de choques utilizando información de la Ruta Nacional 1; los métodos que utiliza son: frecuencia de choques, tasa de choques, tasa crítica de choques, índice equivalente de solo daños a la propiedad.

En la misma línea de aplicación de métodos reactivos simples, pero en la Ruta Nacional 32 se identificó el TFG Evaluación de las márgenes de carretera sobre la Ruta Nacional No 32 y diseño de soluciones en materia de seguridad vial, realizado por Rodríguez (2013). Se aplicaron los métodos frecuencia de choques, tasa de choques, tasa crítica de choques e índice equivalente de solo daños a la propiedad para identificar tramos de concentración de choques viales relacionados en condiciones de las márgenes de carretera y se propusieron medidas de mitigación, junto con el diseño de sistemas de contención vehicular para la Ruta Nacional 32.

Análogo al estudio realizado por Rodríguez (2013), Castro (2013) realiza el TFG titulado Análisis de sitios de concentración de choques viales en la Ruta Nacional 32, utilizando el método de exceso de frecuencia de choques esperado con el ajuste de Bayes empírico. En este implementó el método de exceso de frecuencia de choques esperado con el ajuste Bayes empírico en la Ruta Nacional 32 y se propusieron medidas de mitigación.

Posteriormente, Varela (2016) realiza el Análisis de sitios de concentración de choques viales en la Ruta Nacional 34 utilizando el método de exceso de frecuencia de choques esperado con el ajuste de Bayes empírico, en el cual aplicó nuevamente el método de exceso de frecuencia de choques esperado con el ajuste Bayes empírico en la Ruta Nacional 34, así como la recomendación de medidas de mitigación.

Leiva (2016) realizó el estudio Análisis de sitios de concentración de choques viales en la Ruta Nacional 2, mediante el método de exceso de frecuencia de choques esperado. En este se implementó nuevamente el método de exceso de frecuencia de choques esperado con el ajuste Bayes empírico en la Ruta Nacional 2 y se propusieron medidas de mitigación.

Las referencias anteriores permiten generar un panorama global de la problemática de seguridad vial y de las tendencias a nivel de análisis. Las metodologías implementadas en

los diversos estudios, serán reproducidas, por lo que identificar las observaciones que cada autor realizó a los métodos que utilizaron es de importancia para la investigación.

Adicional a las metodologías que se han utilizado en Costa Rica, se implementará el método de exceso de frecuencia de choques esperado con el ajuste de Bayes Completo, por lo que se recurrió a verificar artículos de diversos investigadores en el tema; de esta forma se verificó que la utilización del ajuste de Bayes Completo no es recurrente en Latinoamérica.

Castro y Agüero (2015) afirman que, al considerar cada viaje como un evento con una probabilidad baja para generar un choque, es posible relacionar el número observado a una distribución Poisson, esto si se asocian los viajes a un tiempo y sitio específicos de la vía.

El inconveniente con la distribución de Poisson es que no permite explicar la dispersión de los choques viales, dada la restricción de que su varianza es igual al promedio. Para realizar el ajuste a la varianza se utiliza la distribución binomial negativa, que se basa en la distribución de Poisson, pero permite que la varianza sea mayor al promedio, por lo que no presenta la restricción de la distribución Poisson (Agüero y Jovanis, 2006).

El ajuste de Bayes Empírico cuenta con la limitación de ignorar la incertidumbre presente en la estructura de correlación de variables, lo que conlleva a la sobreestimación de los parámetros asociados a las covariables, consideración que con el ajuste de Bayes Completo no sucede, ya que toma en consideración la incertidumbre asociada a los estimadores (Agüero y Jovanis, 2008).

También, se ha utilizado el ajuste de Bayes Empírico para reducir el sesgo de regresión a la media al identificar sitios para mejoras en seguridad vial, sin embargo, Carlin y Thomas (2000) critican la reducción al sesgo mediante la obtención del priori a partir de los datos. Esta observación se omite al utilizar el ajuste Bayes Completo, al corregir el sesgo de regresión a la media mediante la consideración del efecto aleatorio espacialmente no estructurado o estructurado.

Lan (2009) fundamenta la selección del ajuste de Bayes Completo sobre el Bayes Empírico en la capacidad de proveer información más detallada, intervalos con mayor credibilidad y distribuciones de parámetros calibrados, así como comparar y seleccionar diferentes formulaciones de modelos como Poisson-Gamma o Poisson-Log Normal.

Según estudios realizados por Park (2016), tanto los ajustes de Bayes Completo y Empírico proveen resultados similares cuando el tamaño de muestra es representativo para los sitios y utilizados para estimar las funciones de desempeños de seguridad, así como suficiente frecuencia de choques en los sitios.

Adicionalmente al seleccionar una metodología que permita estimar el comportamiento de los choques viales, es importante optimizar el proceso de recolección de datos relacionados a la infraestructura vial que puedan utilizarse para realizar análisis en materia de seguridad vial.

Jalayer (2014), posterior a la comparación de diversos métodos y equipos para generar inventarios de infraestructura vial, afirma que el equipo LIDAR móvil permite generar inventarios completos y de alta calidad, enfocado a la obtención de datos para aplicar el Highway Safety Manual (HSM); afirmación que justifica la implementación del análisis Bayesiano Completo basado en datos recolectados mediante sistemas móviles para inventarios de carreteras como se desarrollará en la presente investigación.

Adicionalmente, como síntesis de la problemática vial, cabe destacar el estudio realizado por Agüero y Sánchez (2015), Costos de los choques viales en Costa Rica, quienes indican que, entre costos directos, años de vida potencialmente perdidos y asociados a demoras, se llega a valores cercanos al 10% del Producto Interno Bruto (PIB), aproximadamente 191 mil millones de colones anuales, justificación suficiente para invertir esfuerzos en implementar investigaciones como la que se desarrollará y materializar mejoras en la red vial que permitan reducir la frecuencia y severidad de los choques viales.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

- Determinar los sitios de concentración de choques viales en la Ruta Nacional 1, mediante la utilización de sistemas móviles para el inventario de carreteras y el método de exceso de frecuencia de choques esperado con el ajuste de Bayes Completo.

1.2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar el estado de los choques viales presentes en la Ruta Nacional 1 en el periodo comprendido entre el 2012 y 2014.
- Establecer las variables de la infraestructura vial que pueden recopilarse de forma práctica mediante sistemas móviles de inventario de carreteras.
- Recopilar las principales características de la infraestructura vial mediante la utilización del sistema móvil de inventario de carreteras GEO 3D.
- Identificar los sitios de concentración de choques de la ruta con el ajuste Bayes Completo, Bayes Empírico y diversos métodos reactivos.
- Proponer recomendaciones generales en materia de seguridad vial para los tramos más conflictivos.

1.3 Delimitación del problema

1.3.1 Alcances

- Se analizó la Ruta Nacional 1 considerando los tramos: Autopista General Cañas, Autopista Bernardo Soto y Carretera Interamericana Norte, para un total de 286,7 km de carretera.
- Se excluyeron del análisis los últimos 3 km de vía hasta la frontera norte con Panamá, esto al presentarse comportamientos atípicos con respecto al resto de la vía, causado por la presencia de aduanas y oficinas de migración.
- Mediante la implementación del método de exceso de frecuencia de choques esperado con el ajuste de Bayes Completo se identificaron los tramos críticos de la vía.
- Se realizaron recomendaciones generales en materia de seguridad vial para los tramos más críticos, sin determinar diseños detallados ni estimaciones de costos.

1.3.2 Limitaciones

- Las recomendaciones propuestas son específicas para los puntos o tramos de la ruta analizada, motivo por el cual no pueden utilizarse en otras rutas sin el respectivo análisis. Estas se enfocaron en los sitios de concentración de choques viales evidenciados y la evaluación general de cada sitio, no desde una perspectiva de un análisis integral de movilidad segura.

- La identificación de los sitios críticos de la carretera se realizó con base en la información de choques de tránsito de la base de datos del Consejo de Seguridad Vial de la Ruta Nacional 1, en el periodo comprendido entre el 2012 hasta el 2014, por lo que se supone como veraz la información suministrada.
- La recolección de datos para el análisis Bayes Completo se realizó mediante la utilización de un sistema móvil para el inventario de carreteras, por lo que la base de datos se consideró representativa del estado de la carretera durante el periodo en el cual se realizó el levantamiento de la información en campo.
- El método de exceso de frecuencias de choques esperados con el ajuste de Bayes Completo no se ha aplicado en Costa Rica, únicamente con el ajuste de Bayes Empírico, por lo cual es escasa la información respecto a la aplicación y respuesta del método.
- La velocidad de cada tramo se representó mediante la velocidad reglamentaria, no la de operación.

1.4 Metodología

La metodología que se implementó para el desarrollo de la investigación se dividió en 4 etapas, presentes en la Figura 1-1, necesarias para el cumplimiento de los objetivos específicos propuestos.

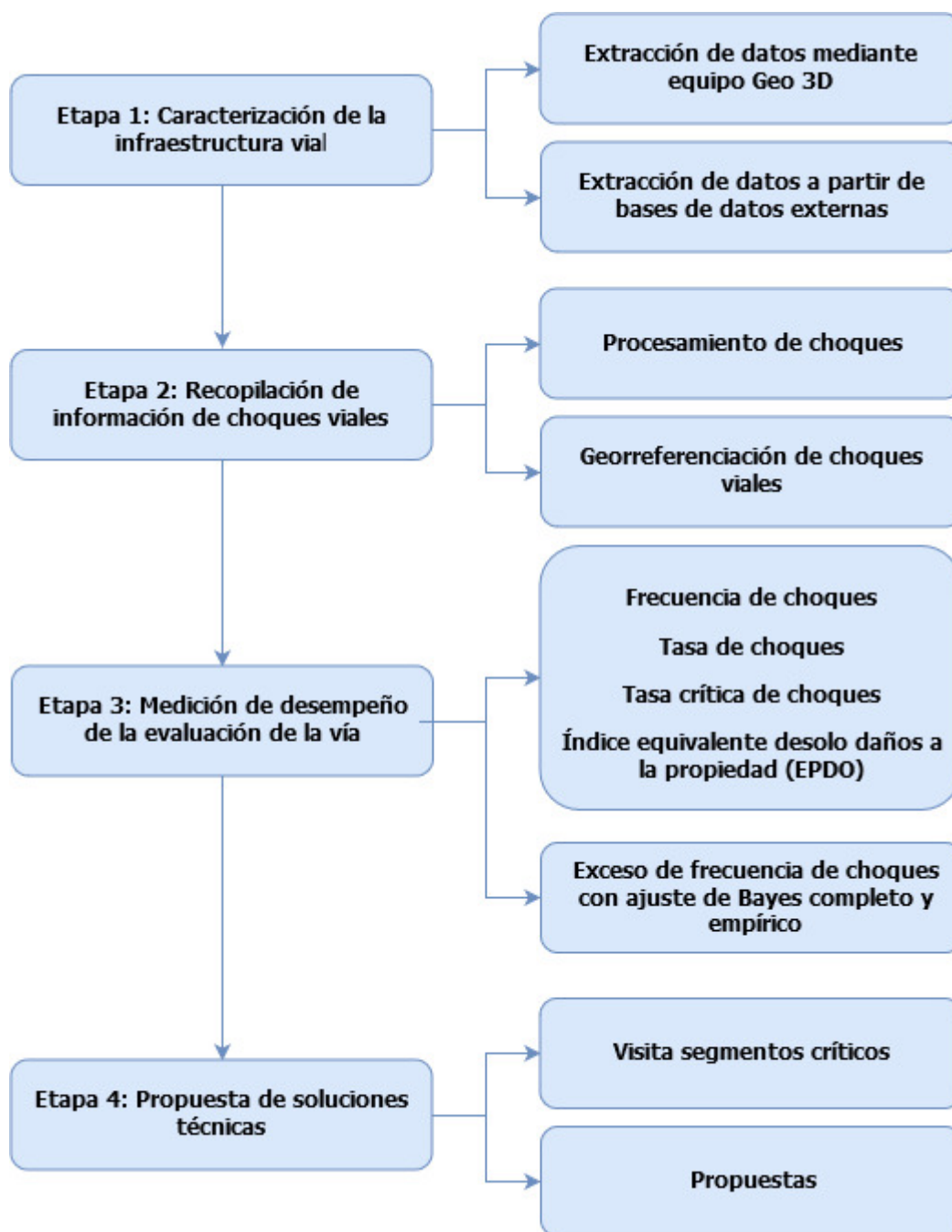


Figura 1-1. Esquema metodológico

1.4.1 Etapa 1: Caracterización de la infraestructura vial

Para realizar la caracterización de la infraestructura vial de la Ruta Nacional 1, se utilizó el levantamiento digital generado por parte del PITRA-LanammeUCR, mediante el sistema móvil para inventario de carreteras GEO 3D.

Se determinaron las variables de la ruta que fueron viables recopilar de forma práctica y con una frecuencia suficiente para la implementación en las modelaciones, enfocadas en mejorar la seguridad vial.

Al analizar la variabilidad de las características de la infraestructura vial, se determinaron tramos homogéneos con los que se filtraron los datos de choques viales por tramo homogéneo.

1.4.2 Etapa 2: Recopilación de información de choques viales

Los datos de choques viales fueron solicitados al Consejo de Seguridad Vial (COSEVI), estos incluyen información de las condiciones viales y afectados del choque vial, así como la severidad del evento segmentado en las siguientes categorías:

- Choques con muertos
- Choques con heridos graves
- Choques con heridos leves
- Choques con solo daños materiales

Los eventos se ubicaron geográficamente mediante las coordenadas recopiladas por el oficial de tránsito en el sitio o se determinaron con base en la dirección del choque reportada en el parte oficial, mediante la ayuda de los programas ArcGIS, Google Earth, Google Maps y Google Streets.

1.4.3 Etapa 3: Medición de desempeño de la evaluación de la vía

Se utilizaron diversos métodos de medición de desempeño para evaluar el potencial latente al intervenir los tramos que presenten altas concentraciones de choques viales, entre los métodos se encuentran:

- Frecuencia de choques
- Tasa de choques
- Tasa crítica de choques
- Frecuencia promedio para choques equivalente a solo daños de propiedad (EPDO)

- Exceso de frecuencia de choques esperado con el ajuste de Bayes Empírico
- Exceso de frecuencia de choques esperado con el ajuste de Bayes Completo

1.4.4 Etapa 4: Propuesta de soluciones técnicas

Posterior a la identificación de los tramos de concentración de choques viales, las características de la infraestructura vial y los conflictos presentes en las zonas, se propusieron medidas de mitigación en materia de seguridad vial que permitan reducir la severidad y frecuencia de choques viales. Las medidas son recomendaciones iniciales para los tramos más críticos, sin determinar diseños detallados ni estimaciones de costos.

Capítulo 2 . Marco teórico

Posterior a la definición de los objetivos del proyecto y la metodología utilizada, es necesario definir conceptos base y los métodos implementados en el desarrollo de la investigación, expuestos en el presente capítulo.

2.1 Identificación de sitios de concentración de choques viales

Ante la problemática de choques viales y las restricciones presupuestarias típicas de un país en vías de desarrollo, es de vital importancia priorizar las intervenciones en sitios cuyos efectos sean de mayor impacto.

Para ello, el Highway Safety Manual (HSM) de la AASHTO (2010), plantea los métodos predictivos, los cuales permiten evaluar y comparar la frecuencia de choques esperados ante condiciones como:

- Facilidades existentes ante volúmenes pasados y futuros.
- Alternativas de diseño para facilidades existentes ante volúmenes pasados y futuros.
- Diseño de nuevas facilidades ante proyecciones de volúmenes.
- Estimar la efectividad de medidas previo y posterior a su implementación.

Estos métodos permiten estimar la cantidad de choques promedio esperada y compararla contra los choques reales, basado en el volumen vehicular, características geométricas, condiciones operativas y/o condiciones asociadas a los materiales de la vía.

Tanto el Road Safety Manual (PIARC Technical Committee on Road Safety, 2003) como el HSM (AASHTO, 2010) plantean diversas metodologías para realizar la identificación de sitios de concentración de choques viales, dentro de las cuales se encuentran, ordenadas de menor a mayor complejidad:

- Frecuencia de choques
- Tasa de choques
- Tasa crítica de choques
- Frecuencia promedio para choques equivalente a solo daños de propiedad (EPDO)
- Exceso de frecuencia de choques esperado con el ajuste de Bayes Empírico
- Exceso de frecuencia de choques esperado con el ajuste de Bayes Completo

Estos métodos cuentan con virtudes o limitaciones tan básicas como su simpleza, variables a utilizar, coeficientes o parámetros de entrada o, en el caso de los métodos estadísticos con ajuste de Bayes, el grado de dificultad.

Es importante destacar que existe una variación temporal en la ocurrencia o frecuencia de los choques viales, efecto conocido como regresión a la media, condición subsanable mediante el ajuste de Bayes Completo.

2.1.1 Frecuencia de choques

Es el más simple de los métodos mencionados y se basa exclusivamente en la cantidad de choques viales por segmento de análisis y la cantidad de segmentos del tramo en cuestión.

Se determina un segmento crítico donde la frecuencia de choques excede el umbral de investigación seleccionado, umbral determinado por la sigla I_T . Este umbral se puede determinar de forma arbitraria o mediante la multiplicación de la frecuencia de choques promedio f_{rp} por un factor, sin embargo, se debe considerar el presupuesto disponible.

$$f_{rp} = \frac{\sum f_j}{n} \quad \text{Ecuación 2-1}$$

donde:

f_{rp} : frecuencia de choques promedio

f_j : frecuencia de choques para un sitio j de una población de referencia

n : número de secciones

Se debe determinar un valor de f_{rp} y un umbral para cada tramo homogéneo de interés y se compara con las frecuencias obtenidas de cada segmento que la conforma.

2.1.2 Tasa de choques

El método se basa en la proporción del número de choques y una medida elegida, típicamente el flujo vehicular o tránsito promedio diario.

Para calcular la tasa para cada tramo se utiliza la ecuación:

$$R_j = \frac{f_j \times 10^6}{365,25 \times PL_j Q} \quad \text{Ecuación 2-2}$$

donde:

R_j : tasa de choques en el sitio j (acc./Mveh-km)

f_j : frecuencia de choques en el sitio j

P: periodo de análisis (años)

L_j : longitud de la sección en el sitio j (km)

Q_j : tránsito promedio diario anual del sitio j (TPDA)

Además, se calcula la tasa de choques promedio para la población de referencia con la fórmula:

$$R_{rp} = \frac{\sum f_j \times 10^6}{365,25 \times P \sum L_j Q_w} \quad \text{Ecuación 2-3}$$

donde:

R_{rp} : tasa de choques promedio (acc./Mveh-km)

f_j : frecuencia de choques en el sitio j

P: periodo de análisis (años)

L_j : longitud de la sección en el sitio j (km)

Q_w : tránsito promedio diario anual en el sitio j (TPDA).

$$Q_w = \frac{\sum (Q_j \times L_j)}{\sum L_j} \quad \text{Ecuación 2-4}$$

Finalmente se utiliza la R_{rp} para obtener el umbral, según el factor que se utilice para multiplicarlo, por lo que cualquier valor de R_j igual o superior al umbral se considera como un segmento crítico.

2.1.3 Tasa crítica de choques

El método es análogo al de tasa de choques, con la particularidad de que incorpora el parámetro K, valor que supone un efecto estadístico en los resultados asociado al nivel de confianza esperado.

Sumado a los cálculos del método tasa de choques, se incorpora la estimación del parámetro R_{cj} .

$$R_{cj} = R_{rp} + K \sqrt{\frac{R_{rp} \times 10^6}{365,25 \times PL_j Q_j}} + \frac{1 \times 10^6}{730,5 \times PL_j Q_j} \quad \text{Ecuación 2-5}$$

donde:

R_{cj} : tasa de choques critica en el sitio j (acc./Mveh-km).

R_{rp} : tasa de choques promedio en sitios similares (acc./Mveh-km).

K: constante estadística

1,036 para un nivel de confianza de 85%

1,282 para un nivel de confianza de 90%

1,645 para un nivel de confianza de 95%

2,326 para un nivel de confianza de 99%

P: periodo de análisis (años)

L_j : longitud de la sección en el sitio j (km)

Q_j : promedio del tránsito promedio diario anual en el sitio j (TPDA)

Finalmente, se utiliza como umbral la tasa crítica de choques del sitio, si la tasa de choques iguala o supera el umbral se considera como zona de riesgo.

2.1.4 Índice equivalente de solo daños a la propiedad (Índice EPDO)

El índice EPDO por sus siglas en inglés (Equivalent Property Damage Only), a diferencia de los tres métodos explicados previamente, considera el efecto de la severidad del evento, por lo que más que la cantidad de eventos por segmento en la toma de decisiones.

Para convertir las distintas severidades a solo choques con daños materiales, se utilizaron las siguientes equivalencias, utilizadas por Castro (2013) y basadas en la investigación de costos por choques viales en México realizada por Peniche (2007):

- Choques con solo daños materiales: 1
- Choques con heridas graves: 12
- Choques con heridas leves: 3
- Choques con fallecidos: 40

Al calcular según la población de referencia, para cada sitio debe ser calculado un índice EPDO y el promedio:

$$EPDO_j = \sum w_i \times f_{ij} \quad \text{Ecuación 2-6}$$

donde:

$EPDO_j$: índice EPDO en el sitio j.

w_i : factor de peso para un accidente de severidad i

f_{ij} : frecuencia de un accidente de severidad i en el sitio j

Siguiendo los factores de peso que han sido sugeridos por Castro (2013), se determina el EPDO promedio:

$$\overline{EPDO}_j = \frac{EPDO_j}{f_j} \quad \text{Ecuación 2-7}$$

donde:

\overline{EPDO}_j : índice EPDO promedio en el sitio j

$EPDO_j$: índice EPDO en el sitio j

f_j : frecuencia de accidente en el sitio j

Se calcula el índice \overline{EPDO} en la población de referencia \overline{EPDO}_{rp}

$$\overline{EPDO}_{rp} = \frac{\sum \sum w_i \times f_{ij}}{\sum f_j} \quad \text{Ecuación 2-8}$$

Al igual que en el resto de métodos, se fija un umbral al multiplicar un factor por el \overline{EPDO}_{rp} y se compara con el \overline{EPDO}_j . Si se iguala o supera el umbral se considera como segmento de riesgo.

2.1.5 Teorema de Bayes

Previo a la explicación de los métodos de exceso de frecuencia de choques esperado con el ajuste de Bayes Empírico y Completo, es necesario definir el teorema de Bayes, la inferencia bayesiana de los datos y conceptos básicos necesarios para su comprensión.

La estadística bayesiana se basa en el teorema de Bayes, generado por el ministro presbiterano y matemático Thomas Bayes, publicada póstumamente (Barnard y Bayes, 1958).

Gelman, Carlon, Stern, Bunson, Vehtari y Rubin (2014) definen tres etapas a considerar al realizar un análisis de datos bayesiano:

1. Estructurar un modelo de probabilidad completo: definir una distribución de probabilidad conjunta para todas las variables observables y no observables de un problema. El modelo debe ser consistente con el conocimiento científico acerca del problema y los datos.
2. Condicionar los datos: calcular e interpretar apropiadamente una distribución posterior.
3. Evaluar la bondad de ajuste del modelo y las implicaciones de la distribución posterior resultante: debe conocerse el ajuste del modelo a los datos, así como identificar si las conclusiones son razonables.

Agüero, J., Lan, B. y Lovegrove, G. (2017) plantean que la inferencia bayesiana inicia desde una distribución de probabilidad $f(y|\theta)$, sea y los datos observados y θ un vector de parámetros de la distribución de probabilidad. Esta distribución de probabilidad asociada a los datos observados se define como la *función de verosimilitud*.

Dado que la estadística bayesiana, a diferencia de la estadística frecuentista supone los parámetros como aleatorios, se define una distribución adicional denominada *distribución previa*, esta responde al conocimiento previo de las variables asociadas al modelo, denominada $\pi(\theta)$.

Finalmente, el objetivo de la estadística bayesiana es estimar una *distribución posterior*, esta considera los parámetros θ y los datos observados y , interpretada como $f(\theta|y)$.

De manera simplificada la estimación de la distribución posterior se resume en la Ecuación 2-9, sin embargo, la complejidad del método radica en la complejidad de las funciones de densidad de cada distribución de probabilidad.

$$f(\theta|y) = \frac{f(y|\theta)\pi(\theta)}{\int f(y|\theta)\pi(\theta)d\theta} \quad \text{Ecuación 2-9}$$

Carlin y Louis (2000) detallan algunos beneficios de la inferencia bayesiana sobre la frecuentista, resumidos a continuación:

- Permite incorporar información previa para estimar la distribución posterior.
- Las inferencias son de fácil comprensión.
- Todas las inferencias resultan de la distribución posterior.
- No está sujeto a la cantidad de repeticiones del evento.
- Permite el análisis estadístico con un tamaño de muestra reducido.

Como se indicó previamente, la limitación de la inferencia bayesiana radica en la complejidad de las funciones, en particular la integral en el denominador de la Ecuación 2-9. Por ello, según Agüero, J., Lan, B. y Lovegrove, G. (2017) la implementación del método Cadenas de Markov Monte Carlo (MCMC) permiten solventar la problemática, esto al muestrear la distribución posterior, en vez de buscar una solución exacta.

Para realizar el muestreo, se utilizó el programa OpenBUGS que se basa en los métodos Muestreo de Gibbs y el Algoritmo de Metropolis.

2.1.6 Exceso de frecuencia de choques esperado con ajuste de Bayes empírico

Al utilizar la inferencia bayesiana para la identificación de sitios de concentración de choques viales, existe la simplificación denominada Bayes empírico que aplica los conceptos del teorema de Bayes, pero obtiene la ecuación mediante supuestos frecuentistas.

Dentro de las limitaciones de esta aproximación sobresale el uso de distribuciones comúnmente de tipo Poisson o Binomial negativa, ya que debe tomarse en consideración que algunas distribuciones de probabilidad como una Poisson Log Normal no se pueden resolver mediante la estadística clásica.

Para casos de la aplicación del método con ajuste de Bayes empírico, se utilizó una distribución binomial negativa en vez de una Poisson, esto a pesar de que los choques observados presentan dicha distribución.

La selección de la distribución binomial negativa radica en la afirmación de Agüero y Jovanis (2006), en la cual la distribución no cuenta con inconvenientes asociados a la sobredispersión de los datos, condición que se evita al permitir una varianza mayor al promedio.

Según detalla Varela (2016), la regresión binomial negativa corresponde a una distribución de probabilidad discreta, que se puede considerar como una Poisson con una media λ_i , presente en la Ecuación 2-10.

$$\ln(\lambda_i) = X_i * \beta + \varepsilon_i \quad \text{Ecuación 2-10}$$

donde:

X: vector de covariables

β : vector de coeficientes

ε : error

Basado en la distribución binomial negativa con los datos de choques y las covariables, se genera una función de desempeño de seguridad en el programa R Studio, análoga a la Ecuación 2-11.

$$\ln(N_{pred}) = \beta_0 + \beta_1 * \ln(TPD) + \ln(Longitud) + \beta_i * X_i + \dots \quad \text{Ecuación 2-11}$$

$$\dots + \beta_n * X_n$$

donde:

N_{pred} : choques predichos

β_0 : constante

β_1 : constante asociada al TPD

β_i : constante de las variables X_i , sea i: 2, 3, ..., n

X_n : variables significativas asociadas al modelo

Al despejar la Ecuación 2-11, se obtiene la Ecuación 2-12 que permite aplicar la metodología de la AASHTO (2010) para la estimación del exceso de frecuencia de choques.

$$N_{pred} = e^{\beta_{intercepto}} * L * TPD^{\beta_{TPD}} * e^{\beta_1 * X_1} * \dots * e^{\beta_n * X_n} \quad \text{Ecuación 2-12}$$

La AASHTO (2010) realiza el cálculo de los choques esperados a partir de la Ecuación 2-13

$$N_{esp} = w * N_{pred} + (1 - w) * N_{obs} \quad \text{Ecuación 2-13}$$

donde:

N_{esp} : Choques esperados

w: factor de ajuste

N_{obs} : choques observados en base de datos

Sea el factor de ajuste w se obtiene a partir de la Ecuación 2-14

$$w = \frac{1}{1 + k(N_{pred})} \quad \text{Ecuación 2-14}$$

donde:

k: parámetro de sobre dispersión

Finalmente se obtiene el exceso de frecuencia de choques esperados de la diferencia entre los choques esperados y los choques predichos como se detalla en la Ecuación 2-15.

$$\Delta = N_{esp} - N_{pred} \quad \text{Ecuación 2-15}$$

2.1.7 Exceso de frecuencia de choques esperado con ajuste de Bayes completo

Para el caso de la inferencia bayesiana para la identificación de sitios de concentración de choques viales con el ajuste de Bayes completo, se puede incurrir en una mayor personalización del modelo, tomando en consideración distribuciones de probabilidad distintas para las covariables, así como para cada parámetro de cada distribución.

Para el caso desarrollado se utilizó una distribución Poisson Log Normal, distribución que no se podría resolver por medio de la estadística frecuentista. Agüero, J., Lan, B. y Lovegrove, G. (2017) afirman que la distribución Poisson Log Normal es la más simple para modelos

univariados, pero una de las más utilizadas. Esto por la mayor flexibilidad que se le da a la distribución Poisson al definir sus parámetros como normales, así como la varianza con una distribución Gamma.

Para realizar el muestreo se utilizó el programa OpenBUGS, con la que se obtuvieron los coeficientes de la función de desempeño análoga a la de la Ecuación 2-11. A nivel de procedimiento entre ambos acercamientos bayesianos, radica la diferencia de que el método con ajuste bayesiano completo recurre al muestreo de la distribución posterior, obtenida posterior a 100.000 iteraciones, por lo que los deltas del modelo, no requieren de ajustes por sobredispersión.

Adicional a las mejoras que las distribuciones de probabilidad generan, el método permite realizar inferencia sobre cada una de los coeficientes de las variables y de los deltas por segmento, por lo que es posible afirmar un nivel de confiabilidad al observar los valores de la distribución de probabilidad posterior.

Muestrear la probabilidad posterior mediante el método MCMC permite tener una mayor certeza acerca de los resultados de los deltas, por lo que la identificación de los sitios con mayor exceso de frecuencia no solo mejora al estimar de forma más apropiada el parámetro en sí, sino que, se cuenta con los valores de la distribución posterior específica, lo que permite verificar la confiabilidad del delta de cada segmento.

2.1.7.1 Criterio de bondad de ajuste

Como criterio para discernir entre modelos que representen mejor el fenómeno de interés, existe en la inferencia bayesiana el "Criterio de desviación de la información", (DIC, Deviance Information Criterion), propuesto por Spiegelhalter, Best, Carlin y Linde (2002).

$$DIC = D(\bar{\theta}) + 2p_D = \bar{D} + 2p_D \quad \text{Ecuación 2-16}$$

donde:

$\bar{\theta}$: media posterior de los parámetros de interés

$D(\bar{\theta})$: desviación evaluada en $\bar{\theta}$

p_D : número efectivo de parámetros en el modelo

\bar{D} : media posterior de la desviación estadística $D(\bar{\theta})$

Agüero y Pujol (2015) complementan que el DIC está basado en la distribución posterior de las estadísticas de la desviación, por lo que se puede interpretar como una generalización del Criterio de información de Akaike (AIC, Akaike Information Criterion).

De forma análoga al criterio AIC, se considera un mejor ajuste cuando el DIC presenta un valor menor entre modelos.

2.2 Equipo de inventario móvil

El equipo de auscultación visual que se utilizó para realizar el levantamiento de la información fue el equipo Trident 3D modelo MX-1. Este cuenta con 6 cámaras de alta resolución, GPS, una unidad de medición inercial, unidad de medición de distancias y 3 servidores de gran capacidad que se incorporan a un vehículo automotor que recorre las vías para realizar los levantamientos (ver Figura 2-1).



Figura 2-1. Equipo Trident 3D modelo MX-1

Mediante el procesamiento realizado con el programa Trimble, se visualizan las 6 cámaras de forma simultánea, tal y como se observa en la Figura 2-2; lo que permite caracterizar el entorno y realizar mediciones a diversas secciones de la vía.

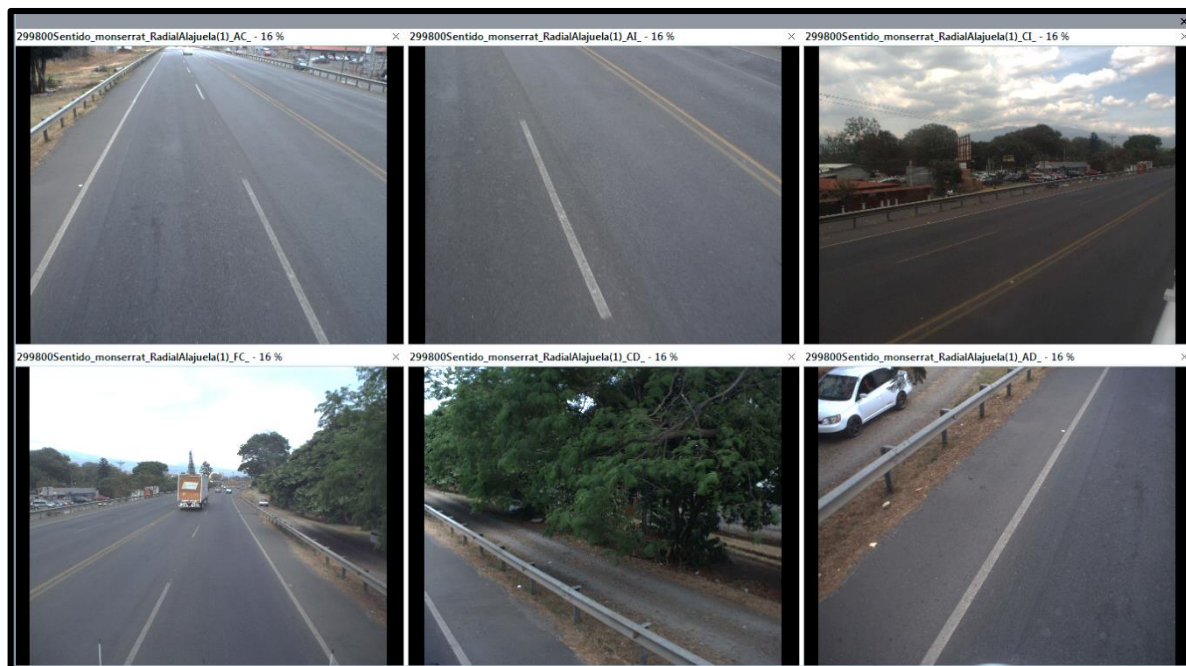


Figura 2-2. Visualización de 6 cámaras para auscultación visual

Este equipo se utiliza en Costa Rica prioritariamente para la auscultación de deterioros en la carpeta asfáltica, datos que se incorporan al informe bianual de evaluación de la red vial nacional pavimentada generado por el PITRA-LanammeUCR.

A nivel de seguridad vial, el equipo se utilizó en el TFG realizado por Segura (2015), donde estimó las variables ancho de carril, pendiente longitudinal y transversal, monotonía de la conducción, radio mínimo en curva y distancia de visibilidad en curva vertical y horizontal; esto mediante los datos generados por el Geo 3D y procesados mediante el programa Trimble, ArcGIS y AutoCAD. Sin embargo, el uso del equipo en Costa Rica no se ha generalizado en materia de seguridad vial.

La versatilidad de los equipos de inventario móvil, en conjunto con un equipo LIDAR, presentan una gran herramienta para la obtención de datos de forma ágil y detallada. Esto lo evidencia Martín, Zazo, Arranz, Rodríguez y González (2018) en España al analizar la

consistencia del alineamiento horizontal en 3 segmentos de ruta, esto mediante los datos generados con un LiDAR móvil.

Inclusive se puede llegar a aproximaciones de toda la superficie de la vía como lo aplicaron Husain y Chandra (2018) en Egipto, al lograr completar un 93,91% de la superficie registrada con un LIDAR, acompañado de un 96,94% de certeza en la superficie generada.

2.3 Medidas de mitigación

El presente apartado resume algunas medidas de mitigación que se plantearon como solución para solventar los problemas de accidentabilidad y severidad de choques viales.

2.3.1 Canalización de movimientos en intersecciones o accesos

La intención de la medida, según Elvik, Høy, Vaa, y Sørensen (2009), es separar movimientos del flujo vehicular, mejorar la visibilidad y establecer patrones de movimientos predecibles. La medida puede implementarse con separación física mediante dispositivos o con demarcación en la vía.

Esta medida puede implementarse con separación física mediante dispositivos o con demarcación en la vía y permite generar carriles de giro izquierdo y/o derecho desde la vía principal hacia secundarias, o en caso de vías de mayor tránsito, canalizar mediante carriles en los extremos de la vía.

2.3.2 Ampliación del derecho de vía

En ocasiones es necesario ampliar la sección con el fin de mejorar su geometría y/o dotar a la vía de facilidades para usuarios de movilidad activa, en la cual la infraestructura no solo responde al vehículo, también a los peatones y ciclistas.

La ampliación del derecho de vía puede ser necesaria para mejorar los anchos de carril, aumentar cantidad de carriles, construir marginales, construir cunetas con pendientes apropiadas, aceras, espaldones, infraestructura ciclista, medianas, bahías de autobús, etc., por lo que, a pesar de no ser atractiva a nivel de costo, es una alternativa necesaria para mejorar las condiciones de seguridad vial.

2.3.3 Mejoras en márgenes de la vía

En ocasiones el riesgo se presenta en el margen de la vía, de forma puntual como un puente o de forma continua como un talud. En caso de que sea posible, debe considerarse como

primera medida eliminar el riesgo, en caso de que no sea posible, modificarlo o trasladarlo, y si no es viable, colocar un sistema de contención vehicular para reducir la severidad de los choques viales. En último caso se recurre a demarcar el riesgo a través de señalamiento vertical y demarcación horizontal.

En el caso específico de las cunetas con sección reducida, en caso de que no sea posible construir una cuneta de seguridad, debe asegurarse la transitabilidad sobre la cuneta mediante el recubrimiento de las mismas con rejillas.

2.3.4 Sistemas de contención vehicular

Este dispositivo tiene como función reducir la severidad de un choque por salida de vía, tanto para los usuarios del vehículo como los del entorno, deben contar con un certificado de cumplimiento de las normas NCHRP 350, MASH o UNE-EN-1317 y especificaciones detalladas acerca de su correcta instalación.

En el caso específico de las barreras medianeras de concreto, existen secciones diseñadas para albergar luminarias, sin que estas sean colisionadas o que generen discontinuidades en el sistema.

2.3.5 Bandas rugosas en espaldón

Esta medida de bajo costo consiste en generar un cambio en la textura del espaldón, suficiente para que, al salirse un vehículo de la vía, este perciba una vibración y retorne al carril de forma segura.

El National Cooperative Highway Research Program (2009) las separa en bandas fresadas, corrugadas y elevadas; y evidencia que su efectividad ha alcanzado reducciones del 80% en la cantidad de choques viales por salida de carril en Arizona.

2.3.6 Líneas o bandas reductoras de velocidad

Esta medida consiste en demarcación transversal al carril con relieve, que permite alertar a los conductores ante la presencia de un cambio en la vía y generar una reducción en la velocidad de operación, esto mediante el efecto sonoro y vibratorio.

El manual del SIECA (2014) detalla su uso previo a curvas o intersecciones, en las aproximaciones a centros atractores y generadores de viajes como los son poblados, áreas comerciales, zonas escolares, hospitales o ante cambios en la geometría de la vía.

2.3.7 Carriles de aceleración y desaceleración

Los carriles de aceleración y desaceleración permiten canalizar los flujos vehiculares de entrada y salida y proveen de una longitud de vía suficiente para que estos reduzcan o aumenten la velocidad para salir hacia un acceso o para incorporarse a una vía de mayor velocidad de forma segura.

Esta medida aplica tanto en autopistas, zonas rurales, bahías de autobús y transiciones hacia y desde marginales.

2.3.8 Dispositivos delineadores

Para aumentar la atención de los conductos, se pueden implementar dispositivos que permitan canalizar o guiar a los usuarios por la vía, así como alertarlos de cambios o riesgos latentes.

Estos dispositivos son tan simples como los captaluces que en condiciones de baja iluminación permiten informar al conductor la ubicación del carril y los sentidos de circulación.

También se pueden implementar delineadores y/o postes abatibles que permiten informar al conductor acerca de condiciones de riesgo en los márgenes, canalizar flujos en sentidos opuestos para evitar invasión de carril, mejorar las condiciones de visibilidad e incentivar reducciones de velocidad ante cambios en la vía, como lo es un cruce peatonal o una reducción de carriles.

2.3.9 Dispositivos de iluminación

El dispositivo más común para iluminar las vías son los postes de iluminación o luminarias, sin embargo, existen dispositivos con paneles solares e iluminación como lo son los captaluces y bolardos.

2.3.10 Cruces de fauna

Con el fin de evitar el atropello de animales, deben incorporarse pasos que respondan a las necesidades de las distintas especies, contemplando los niveles superiores y aéreos, a nivel de calzada e inferiores. Pueden implementarse como puentes colgantes, túneles falsos, pasos inferiores, entre otros.

Capítulo 3 . Descripción de los datos

Para aplicar los métodos de identificación de sitios de concentración de choques viales, fue necesario recopilar datos que caracterizaran la vía y los eventos, información que se detalla a continuación.

3.1 Choques viales

La base de datos de choques viales suministrada por el COSEVI comprendió los años 2012, 2013 y 2014, con eventos segmentados según severidad con fallecidos, heridos graves, heridos leves y solo daños materiales, registrados por evento y personas afectadas.

Los eventos con heridos fueron suministrados con georreferencia y a nivel de ruta nacional, de los cuales se presentaron 2007 eventos de choques viales con 4897 personas afectadas. Del total de eventos con heridos, categorizado según el usuario más crítico, 73 correspondieron a fallecidos, 313 a heridos graves, 1620 a heridos leves y 1 caso mal clasificado como ileso, correspondiente a solo daños materiales.

En el caso de los choques con solo daños materiales, la información es suministrada a nivel de distrito, para un total de 26887 choques con 57285 personas imputadas, de los cuales 12457 eventos presentaban georreferencia y 14430 eventos únicamente indicaban la descripción del lugar de los hechos.

Los 14430 eventos fueron georreferenciados basados en la descripción del sitio del evento, esto con el fin de posteriormente filtrar los que correspondieran específicamente a la Ruta Nacional 1.

Posterior a la georreferenciación de todos los datos de choques viales, se delimitó el área de estudio a 286,7 km de la ruta, dejando de lado los últimos 3 km que corresponden a un tramo afectado externamente por la dinámica del límite territorial de Costa Rica con Nicaragua.

Como criterio de selección de los choques viales con solo daños materiales asociados a la ruta de estudio, se consideró un radio de 50 m a partir del trazado de la vía, para un total de 7136 partes con solo daños materiales y para el caso de heridos, la severidad máxima de los eventos se segmentó en 72 con fallecidos, 313 con heridos graves y 1611 con heridos leves, para un total de 9132 eventos.

Dado que el modelo generado es solo para segmentos, se eliminaron los eventos en intersección según los siguientes criterios:

- Identificación de choques viales con ubicación especificada en intersecciones.
- Identificación de choques viales a 50 m a la redonda de las intersecciones.

Esto limitó la base de datos a 5067 eventos, correspondiente al 55,5 % de los choques totales de toda la vía, segmentados según la severidad máxima registrada en el evento en 43 fallecidos, 192 heridos graves, 966 heridos leves y 3866 con solo daños materiales.

3.1.1 Clasificación de la vía

Para segmentar los choques viales según el comportamiento de los flujos vehiculares, clasificación funcional y geometría de la vía, se generaron 3 tramos de análisis presentes en la Tabla 3-1. En este se detalla el punto de inicio y final, a nivel de descripción y de ubicación en kilómetros, así como la extensión del tramo y la cantidad de tramos homogéneos en los cuales fue segmentada.

Tabla 3-1. Descripción de tramos de vía

Variable	Tramo 1	Tramo 2	Tramo 3
Sección	Autopista General Cañas	Autopista Bernardo Soto	Carretera Interamericana Norte
Inicio	Intersección frente a estatua León Cortés	Intercambio río Segundo	Intercambio San Ramón
Fin	Intercambio río Segundo	Intercambio San Ramón	400 m sur, Control de aduanas
Inicio (km)	0	14	55,7
Fin (km)	14	55,7	286,7
Extensión (km)	14	41,7	231
Tramos homogéneos	20	75	283

Nota: En la sección 3.2.2.1 Tramos homogéneos, se detalla el criterio utilizado para definir los tramos homogéneos.

En la Tabla 3-1 se observa que la extensión y cantidad de tramos homogéneos aumenta con respecto al tramo, ya que el tramo 1 presenta una cantidad de 20 tramos homogéneos en 14 km y el tramo 3 presenta 283 tramos homogéneos en 231 km.

De forma complementaria, se desglosa en la Tabla 3-2 la estadística descriptiva asociada a los choques viales, a nivel de tipo de choque, tramo, promedio, desviación estándar, mínimo, máximo y total para el periodo 2012-2014.

Tabla 3-2. Estadística descriptiva de los choques viales en segmentos por tramo para el periodo 2012 – 2014

Tramo 1					
Tipología	Promedio	Desv. E.	Mínimo	Máximo	Acumulado de choques
Fallecidos	0,40	0,75	0	2	8
Heridos graves	1,55	1,76	0	6	31
Heridos leves	16,70	13,42	2	55	334
Daños mat.	100,10	73,09	3	267	2002
Choques totales	118,75	82,86	7	288	2375
Tramo 2					
Tipología	Promedio	Desv. E.	Mínimo	Máximo	Acumulado de choques
Fallecidos	0,16	0,37	0	1	12
Heridos graves	0,72	1,28	0	8	54
Heridos leves	3,55	5,01	0	37	266
Daños mat.	11,25	13,84	0	70	844
Choques totales	15,68	18,46	0	98	1176
Tramo 3					
Tipología	Promedio	Desv. E.	Mínimo	Máximo	Acumulado de choques
Fallecidos	0,08	0,30	0	2	23
Heridos graves	0,38	0,67	0	4	107
Heridos leves	1,29	1,69	0	11	366
Daños mat.	3,60	4,75	0	30	1020
Choques totales	5,36	6,00	0	33	1516
Total					
Tipología	Promedio	Desv. E.	Mínimo	Máximo	Acumulado de choques
Fallecidos	0,11	0,36	0	2	43
Heridos graves	0,51	0,94	0	8	192
Heridos leves	2,56	5,30	0	55	966
Daños mat.	10,23	28,02	0	267	3866
Choques totales	13,40	32,84	0	288	5067

Nota: Generado a partir de Base de datos de choques viales, Ruta Nacional 1. COSEVI, 2016.

De la Tabla 3-2 se evidencia que el tramo 1 es el más crítico, al presentar un promedio de choques de 119 eventos por año por tramo homogéneo, seguido del tramo 2 con 16 choques promedio y del tramo 3 con 5 eventos por año por tramo homogéneo.

Al complementar los datos de la Tabla 3-2 con las longitudes por tramo de la Tabla 3-1, se obtienen 57 choques/km promedio por año para el tramo 1, 9 choques/km para el tramo 2 y 2 choques/km para el tramo 3.

En promedio se presentan 13 choques por cada tramo homogéneo para toda la ruta, con una desviación estándar de 32,84 choques, este representa una tercera parte de los choques promedio por tramo homogéneo del tramo 1. Estos resultados evidencian el alto nivel de accidentabilidad del tramo 1, correspondiente a la sección Autopista General Cañas, agravados por el tránsito promedio diario anual más alto de los tres tramos con un valor máximo en el periodo de estudio de 97279 vehículos/día.

3.2 Caracterización de la infraestructura vial y flujos vehiculares

Para realizar las modelaciones, fue necesario incorporar variables que explicaran la ocurrencia de los choques viales, estas se obtuvieron a partir de bases de datos existentes, procesamiento mediante el sistema de inventario móvil y/o sistema de información geográfica.

En la Tabla 3-3 se presentan las variables incorporadas a los modelos, así como una descripción de la fuente y método de extracción de la información.

Tabla 3-3. Variables asociadas a la infraestructura vial y flujos vehiculares

Variable	Descripción
Tránsito promedio diario	Datos extraídos de Reporte de TPD del MOPT
Deflectometría de impacto promedio	Datos extraídos de base de datos Informe de evaluación de la red vial nacional pavimentada de Costa Rica 2012-2013
Índice de regularidad internacional (IRI) promedio	
Velocidad reglamentaria	Generado mediante sistema de inventario móvil Geo3D, programa Trident
Número de carriles	
Ancho de carril	
Accesos o intercambios con flujo vehicular importante	
Zona libre disponible	
Longitud	Generado a partir del uso de Google Earth y ArcGIS
Tasa de curvatura	
Tasa de intersecciones por kilómetro	

3.2.1 Recopilación de datos mediante equipo de inventario móvil

Para el análisis se realizó la medición de la variable ancho de carril para cada uno de los 378 tramos homogéneos, lo que permitió cuantificar la variación del ancho de carril de forma práctica y ágil, condición que, de realizarse mediante visitas de campo, no se hubiera podido realizar con la frecuencia efectuada.

Adicional a la medición de ancho de carril, fue posible cuantificar de forma visual la cantidad de carriles y accesos, así como las variaciones en el señalamiento de velocidad reglamentaria y la zona libre disponible. Cabe destacar que, ante la ausencia de registros actualizados de la geometría y señalamiento de la vía, estas variables se tendrían que haber recopilado de forma presencial, labor sumamente extensa e ineficiente al valorar que la vía comprende 286,7 km.

La versatilidad del equipo permitió complementar la labor de georreferenciación de los choques viales, ya que de forma práctica se visualizaron diversas zonas desde el programa Trimble, con el fin de identificar los sitios que los partes de choques viales registraban.

Al iniciar la investigación, se planteó recopilar la mayor cantidad de variables geométricas de forma cuantitativa mediante el equipo Trident 3D modelo MX-1, pero al replicar los procedimientos descritos por Segura (2015), se evidenció que no eran prácticos al aplicarlos

en una ruta completa. Esta limitación radicó en que la mayoría de procedimientos planteados requerían de procedimientos no georreferenciados y manuales mediante el programa AutoCAD, por lo que se pierde la variable de practicidad en la obtención de los datos.

Sumado a lo extenso del proceso de obtención de datos, el equipo no cuenta con la herramienta para generar una nube de puntos a través de toda la vía, conocido por sus iniciales en inglés como LIDAR (*Laser Imaging Detection and Ranging*). Esta limitación elimina la posibilidad de realizar de forma automática, mediante programas complementarios, el procesamiento geométrico de la vía.

Ante la ausencia del equipo LIDAR, el margen de error de las coordenadas XY ronda los 10 cm al medir en el programa Trimble, pero aumenta al intentar medir variables en la coordenada Z, esto según el Ing. Christian Valverde, ingeniero a cargo del equipo Trident 3D modelo MX-1.

Adicionalmente, al depender exclusivamente de los videos para la extracción de datos, las mediciones en un rango confiable se limitaron al carril en el cual el vehículo con los equipos transitó, por lo que la medición de ancho de carril se realizó de forma manual mediante el programa Trimble, no mediante polilíneas basadas en la línea centro y extremos de la demarcación y procesadas en ArcGIS, según planteó Segura (2015).

Cabe destacar que al intentar replicar la generación de polilíneas para procesarlas en el programa ArcGIS y obtener de forma automática el ancho de la vía o carriles, surgieron los siguientes inconvenientes:

- Ausencia de demarcación horizontal en línea centro y extremos.
- Anchos de vía atípicos al trazar polilíneas fuera del rango confiable de medición.

Dadas las limitaciones en la coordenada Z, en el área de medición y en la confiabilidad de los datos generados mediante programas externos al del fabricante, se limitó el uso del equipo a la medición de anchos de carril directamente desde el programa Trimble y el resto de variables indicadas en la Tabla 3-3 se obtuvieron de forma visual y cualitativa, como se explica en la Sección 3.2.2 Análisis de variables.

A pesar de las limitaciones del equipo utilizado, la posibilidad de visualizar, caracterizar y realizar mediciones puntuales en la vía permite la identificación de riesgos y realizar

evaluaciones puntuales, posterior a la identificación de sitios de concentración de choques viales.

3.2.2 Análisis de variables

En la Tabla 3-4, Tabla 3-5 y Tabla 3-6 se presenta la estadística descriptiva de las variables analizadas por tramo, concluyendo con la Tabla 3-7 que resume las variables para toda la ruta. De forma análoga, la Tabla 3-8, Tabla 3-9 y Tabla 3-10 presentan las variables que fueron categorizadas para el modelo, segmentadas por tramo y a manera de resumen en la Tabla 3-11 se presentan los valores de las variables categorizadas para toda la ruta.

Se procede a detallar los hallazgos significativos por variable, así como las consideraciones tomadas para incorporarlas en los modelos.

Tabla 3-4. Estadística descriptiva de variables analizadas para el tramo 1

Variable	Descripción	Prom.	Desv. Est.	Mín.	Máx.
Longitud_real (km)	Longitud tramo homogéneo	0,70	0,35	0,23	1,5
Longitud_XY (km)	Distancia rectilínea entre punto inicial y final de tramo	0,69	0,34	0,23	1,5
n	Cantidad de carriles (total)	5,65	1,04	4	7
Ancho (m)	Ancho de carril	3,48	0,11	3,22	3,7
Tasa de curvatura	$1 - (\text{Longitud_XY} / \text{Longitud_real})$	1,10%	1,59%	0,00%	5,00%
Int/km	Razón de intercambios entre longitud de tramo homogéneo en km	2,53	2,31	0	8,55
Intercambios	Dummy asociado a presencia de acceso o intercambio con flujo vehicular importante	0	0,44	0	1
v (km/h)	Velocidad reglamentaria	75	15,73	40	90
TPD prom (veh/día)	Tránsito promedio diario promedio del 2012 - 2014	78556	11689	69410	96765
FWD prom (mmx10⁻²)	Deflectometría geófono 0 promedio	26,47	14,85	10,73	75,28
MRI prom (m/km)	Índice de regularidad internacional ponderado	2,07	0,60	1,43	3,66

Tabla 3-5. Estadística descriptiva de variables analizadas para el tramo 2

Variable	Descripción	Prom.	Desv. Est.	Mín.	Máx.
Longitud_real (km)	Longitud tramo homogéneo	0,56	0,27	0,20	1,9
Longitud_XY (km)	Distancia rectilínea entre punto inicial y final de tramo	0,53	0,27	0,20	1,9
n	Cantidad de carriles (total)	3,03	0,83	2	6
Ancho (m)	Ancho de carril	3,84	0,33	3,29	4,55
Tasa de curvatura	1 - (Longitud_XY / Longitud_real)	3,24%	5,52%	0,00%	28,00%
Int/km	Razón de intercambios entre longitud de tramo homogéneo en km	1,36	2,45	0	9,09
Intercambios	Dummy asociado a presencia de acceso o intercambio con flujo vehicular importante	-	-	0	1
v (km/h)	Velocidad reglamentaria	76	10,16	60	90
TPD prom (veh/día)	Tránsito promedio diario promedio del 2012 - 2014	27649	8467	22215	75546
FWD prom (mmx10⁻²)	Deflectometría geófono 0 promedio	62,80	15,61	13,34	100,57
MRI prom (m/km)	Índice de regularidad internacional ponderado	3,33	1,20	1,69	6,66

Tabla 3-6. Estadística descriptiva de variables analizadas para el tramo 3

Variable	Descripción	Prom.	Desv. Est.	Mín.	Máx.
Longitud_real (km)	Longitud tramo homogéneo	0,82	0,34	0,15	2,0
Longitud_XY (km)	Distancia rectilínea entre punto inicial y final de tramo	0,79	0,34	0,14	2,0
n	Cantidad de carriles (total)	2,00	0,06	2	3
Ancho (m)	Ancho de carril	3,46	0,25	3,00	5,02
Tasa de curvatura	1 - (Longitud_XY / Longitud_real)	3,67%	6,96%	0,00%	52,00%
Int/km	Razón de intercambios entre longitud de tramo homogéneo en km	1,8	2,48	0	12
Intercambios	Dummy asociado a presencia de acceso o intercambio con flujo vehicular importante	-	-	0	1
v (km/h)	Velocidad reglamentaria	67	12,63	40	80
TPD prom (veh/día)	Tránsito promedio diario promedio del 2012 - 2014	9978	6438	2319	24575
FWD prom (mmx10⁻²)	Deflectometría geófono 0 promedio	53,04	33,91	5,81	145,05
MRI prom (m/km)	Índice de regularidad internacional ponderado	3,84	0,90	1,92	8,24

Tabla 3-7. Estadística descriptiva de variables analizadas para toda la ruta

Variable	Descripción	Prom.	Desv. Est.	Mín.	Máx.
Longitud_real (km)	Longitud tramo homogéneo	0,76	0,35	0,15	2,0
Longitud_XY (km)	Distancia rectilínea entre punto inicial y final de tramo	0,73	0,34	0,14	2,0
n	Cantidad de carriles (total)	2,40	0,98	2	7
Ancho (m)	Ancho de carril	3,54	0,30	3,00	5,02
Tasa de curvatura	1 - (Longitud_XY / Longitud_real)	3,46%	6,54%	0,00%	52,00%
Int/km	Razón de intercambios entre longitud de tramo homogéneo en km	1,75	2,48	0	12
Intercambios	Dummy asociado a presencia de acceso o intercambio con flujo vehicular importante	-	-	0	1
v (km/h)	Velocidad reglamentaria	69	13,02	40	90
TPD prom (veh/día)	Tránsito promedio diario promedio del 2012 - 2014	17113	17679	2319	96765
FWD prom (mmx10⁻²)	Deflectometría geófono 0 promedio	53,46	31,29	5,81	145,05
MRI prom (m/km)	Índice de regularidad internacional ponderado	3,65	1,04	1,43	8,24

Tabla 3-8. Resumen de variables categorizadas para el tramo 1

Variable	Descripción	Frecuencia por categoría				
Ancho (m)	Ancho de carril	<i>A1</i>	<i>A2</i>	<i>A0</i>	<i>A3</i>	<i>A4</i>
		<i>3-3,2 m</i>	<i>3,2-3,5 m</i>	<i>3,5-3,7 m</i>	<i>3,7-4 m</i>	<i>>4 m</i>
		0,0%	65,0%	30,0%	5,0%	0,0%
TC	Tasa de curvatura	<i>TC1</i>	<i>TC2</i>	<i>TC3</i>	<i>TC4</i>	<i>TC5</i>
		<i>0 - 2 %</i>	<i>2 - 9 %</i>	<i>9 - 20 %</i>	<i>20 - 33 %</i>	<i>33 - 52 %</i>
		65,0%	35,0%	0,0%	0,0%	0,0%
ZLD min	Zona libre disponible min	<i>ZLD1</i>	<i>ZLD2</i>	<i>ZLD3</i>	<i>ZLD4</i>	
		85,0%	15,0%	0,0%	0,0%	
v (km/h)	Velocidad reglamentaria	<i>V40</i>	<i>V60</i>	<i>V80</i>	<i>V90</i>	
		5,0%	35,0%	20,0%	40,0%	
n	Cantidad de carriles	<i>N2</i>	<i>N3</i>	<i>N4</i>	<i>N6</i>	
		0,0%	0,0%	25,0%	75,0%	

Tabla 3-9. Resumen de variables categorizadas para el tramo 2

Variable	Descripción	Frecuencia por categoría				
Ancho (m)	Ancho de carril	<i>A1</i>	<i>A2</i>	<i>A0</i>	<i>A3</i>	<i>A4</i>
		<i>3-3,2 m</i>	<i>3,2-3,5 m</i>	<i>3,5-3,7 m</i>	<i>3,7-4 m</i>	<i>>4 m</i>
		0,0%	16,0%	24,0%	33,3%	26,7%
TC	Tasa de curvatura	<i>TC1</i>	<i>TC2</i>	<i>TC3</i>	<i>TC4</i>	<i>TC5</i>
		<i>0 - 2 %</i>	<i>2 - 9 %</i>	<i>9 - 20 %</i>	<i>20 - 33 %</i>	<i>33 - 52 %</i>
		53,3%	37,3%	6,7%	2,7%	0,0%
ZLD min	Zona libre disponible min	<i>ZLD1</i>	<i>ZLD2</i>	<i>ZLD3</i>	<i>ZLD4</i>	
		28,0%	53,3%	16,0%	2,7%	
v (km/h)	Velocidad reglamentaria	<i>V40</i>	<i>V60</i>	<i>V80</i>	<i>V90</i>	
		0,0%	24,0%	61,3%	14,7%	
n	Cantidad de carriles	<i>N2</i>	<i>N3</i>	<i>N4</i>	<i>N6</i>	
		24,0%	53,3%	20,0%	2,7%	

Tabla 3-10. Resumen de variables categorizadas para el tramo 3

Variable	Descripción	Frecuencia por categoría				
Ancho (m)	Ancho de carril	<i>A1</i>	<i>A2</i>	<i>A0</i>	<i>A3</i>	<i>A4</i>
		<i>3-3,2 m</i>	<i>3,2-3,5 m</i>	<i>3,5-3,7 m</i>	<i>3,7-4 m</i>	<i>>4 m</i>
		7,1%	57,6%	24,4%	7,4%	3,5%
TC	Tasa de curvatura	<i>TC1</i>	<i>TC2</i>	<i>TC3</i>	<i>TC4</i>	<i>TC5</i>
		<i>0 - 2 %</i>	<i>2 - 9 %</i>	<i>9 - 20 %</i>	<i>20 - 33 %</i>	<i>33 - 52 %</i>
		59,7%	26,5%	10,2%	2,1%	1,4%
ZLD min	Zona libre disponible min	<i>ZLD1</i>	<i>ZLD2</i>	<i>ZLD3</i>	<i>ZLD4</i>	
		0,7%	24,7%	48,8%	25,8%	
v (km/h)	Velocidad reglamentaria	<i>V40</i>	<i>V60</i>	<i>V80</i>	<i>V90</i>	
		8,8%	49,5%	41,7%	0,0%	
n	Cantidad de carriles	<i>N2</i>	<i>N3</i>	<i>N4</i>	<i>N6</i>	
		99,6%	0,4%	0,0%	0,0%	

Tabla 3-11. Resumen de variables categorizadas para toda la ruta

Variable	Descripción	Frecuencia por categoría				
		A1	A2	A0	A3	A4
Ancho (m)	Ancho de carril	3-3,2 m	3,2-3,5 m	3,5-3,7 m	3,7-4 m	>4 m
		5,3%	49,7%	24,6%	12,4%	7,9%
TC	Tasa de curvatura	TC1	TC2	TC3	TC4	TC5
		0 - 2 %	2 - 9 %	9 - 20 %	20 - 33 %	33 - 52 %
		58,7%	29,1%	9,0%	2,1%	1,1%
ZLD min	Zona libre disponible min	ZLD1	ZLD2	ZLD3	ZLD4	
		10,6%	29,9%	39,7%	19,8%	
v (km/h)	Velocidad reglamentaria	V40	V60	V80	V90	
		6,9%	43,7%	44,4%	5,0%	
n	Cantidad de carriles	N2	N3	N4	N6	
		79,4%	10,8%	5,3%	4,5%	

3.2.2.1 Tramos homogéneos

Para caracterizar los 3 tramos en los que se segmentó la Ruta Nacional 1, fue necesario dividirla en tramos con características similares u homogéneas que permitieran sintetizar las variables y analizar la vía de forma puntual.

Para realizar la identificación de tramos homogéneos se verificó la geometría de la vía y se segmentó al presentarse variaciones importantes entre el número de carriles, presencia de intercambios, cambios en alineamiento horizontal y en la velocidad reglamentaria.

3.2.2.2 Tránsito promedio diario

La información asociada al tránsito promedio diario (TPD) se obtuvo de la página web del MOPT, en el reporte de tránsito promedio diario de la Secretaría de Planificación Sectorial.

Ante la ausencia de registros de TPD para los años estudiados, se realizó una proyección geométrica según los datos disponibles y en caso necesario, basado en tasas de crecimiento de sitios aledaños.

De los registros se identifican valores máximos de 97279 vehículos/día para la Autopista General Cañas y mínimos de 2265 vehículos/día para el tramo de Carretera Interamericana Norte.

3.2.2.3 Velocidad reglamentaria

La velocidad reglamentaria se identificó de forma visual basado en el señalamiento vertical y horizontal de la vía, mediante el programa Trident y únicamente en el sentido San José – Guanacaste.

De la Tabla 3-11 se identifica un 7 % de los tramos homogéneos con velocidades de 40 km/h (V40), 44 % con 60 km/h (V60), 44 % con 80 km/h (V80) y un 5 % con 90 km/h (V90). Sin embargo, al analizar la variable por tramo, un 60 % de los segmentos o más de los tramos 1 y 2 presentan velocidades que exceden los 80 km/h, contra un 42 % de ocurrencia en el tramo 3.

Al categorizar la variable para su incorporación en los modelos, se tomó como variable base la velocidad menor.

3.2.2.4 Número de carriles

La cantidad de carriles de toda la sección de vía se identificó de forma visual, basado en el señalamiento horizontal de la vía y el espacio disponible; este se recopiló mediante el programa Trident.

Del registro presente en la Tabla 3-11 se identificó un 79 % de los tramos homogéneos con 2 carriles (N2), 11 % con 3 carriles (N3), 5 % con 4 carriles (N4) y un 5 % con 6 o más carriles (N6).

Al analizar a nivel de tramo el tramo 1 presenta un 75 % de segmentos con 6 carriles, el tramo 2 cambia y presenta un 77 % de segmentos con 2 o 3 carriles y el tramo 3 predominantemente presenta una geometría de 2 carriles en un 99,6 % de los segmentos.

Al categorizar la variable para su incorporación en los modelos, se tomó como variable base el rango de menor cantidad de carriles disponible según el tramo analizado.

3.2.2.5 Ancho de carril

El ancho de carril se midió mediante el programa Trident, este permitió obtener una estimación por cada tramo homogéneo. Cabe destacar que, por el ángulo de grabación del recorrido, solo se midió un carril en el sentido San José – Guanacaste y se generalizó para toda la sección.

Del registro se identificó a nivel global un 5 % de los tramos homogéneos con anchos entre 3,0 m - 3,2 m (A1), 50 % con anchos entre 3,2 m – 3,5 m (A2), 25 % con valores entre 3,5 m – 3,7 m (A0), 12 % entre 3,7 m – 4,0 m (A3) y un 8 % con más de 4 m de ancho (A4), valores presentes en la Tabla 3-11.

A nivel de tramo, el tramo 1 presenta un 86 % de los segmentos con anchos de al menos 3,5 m o superiores, seguido del tramo 2 con un 84 % y el tramo 3 con solo un 35 %.

Al categorizar la variable para su incorporación en los modelos, se tomó como variable base la categoría A0, esto con el fin de evidenciar el efecto de un ancho de carril en un rango “ideal” de 3,5 m – 3,7 m con respecto a las categorías A1 y A2 inferiores o A3 y A4 superiores.

3.2.2.6 Zona libre disponible

La estimación de la zona libre disponible se realizó de forma aproximada con el programa Trident y con una categorización visual presente en la Figura 3-1, segmentada en cuatro anchos y resumidos en la Tabla 3-11 para la condición global.

La primera categoría (ZLD1) correspondió a la ausencia de zona libre y se presentó en un 10 % de los tramos. La segunda categoría (ZLD2) correspondió a un ancho menor al necesario para que un automóvil salga completamente de la vía y se presentó en un 30 % de los tramos. La categoría tres (ZLD3) consideró los casos en los que la zona libre es suficiente para que un vehículo salga completamente de la vía, condición con una ocurrencia del 40 %. La categoría final o cuatro (ZLD4), correspondió al caso en el cual un vehículo puede alejarse a una distancia superior a la de 1 automóvil del borde externo de la vía y se presentó en un 20 % de los tramos homogéneos. Todas las categorías consideraron la ZLD como una zona visualmente traspasable y recuperable por un vehículo.

A nivel de tramo, resalta que el tramo 1 presenta las ZLD menores, con un 85 % en la categoría ZLD1 y 15 % en ZLD2. En el caso del tramo 2 solo un 18,7 % contempla las categorías ZLD3 y ZLD4, en contraste con el tramo 3 que un 74,6% se posiciona en las mismas categorías.

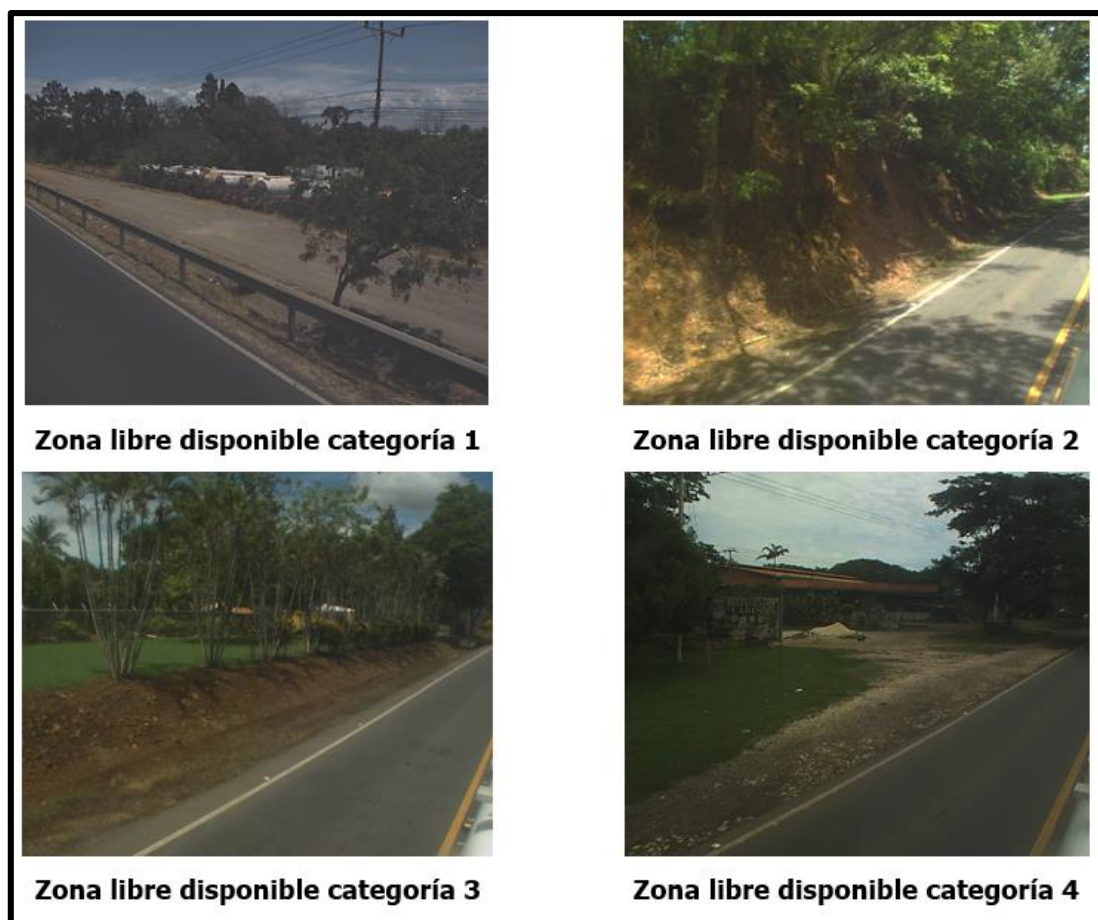


Figura 3-1. Categorización de las zonas libres disponibles

3.2.2.7 Longitud de tramo homogéneo

Al identificar los tramos homogéneos, se identificaron los puntos de inicio y final con el programa Google Earth y mediante el programa ArcMap se dividió la polilínea de la ruta, generando segmentos con las longitudes correspondientes a los tramos homogéneos.

De la Tabla 3-7, en la variable "Longitud real" se identifica que la longitud máxima para dicha variable es de 2 km, longitud que se presentó en el tramo 3. Así como un valor mínimo de 0,14 km, correspondiente a tramos con alta densidad de curvas y variación de la geometría.

3.2.2.8 Accesos o intercambios con flujo vehicular importante

Para especificar en el modelo el efecto de accesos o intercambios importantes en la vía, correspondientes a radiales o accesos a centros poblacionales aledaños a la Ruta Nacional

1, se identificaron mediante una variable muda o “dummy” por tramo homogéneo, para un total de 28 sitios identificados.

Esta variable permitió identificar los segmentos que contaban con un intercambio importante dentro de él, condición que, a pesar de haber eliminado los choques a 50 m a la redonda del intercambio, mantiene un efecto sobre la accidentabilidad del segmento, resultante de las variaciones geométricas con respecto al resto de la vía, diferenciales en la velocidad de operación y las trayectorias de los flujos vehiculares.

3.2.2.9 Tasa de curvatura

Ante la ausencia de planos con el alineamiento horizontal de la vía, se aproximó la curvatura de la vía mediante la estimación de la tasa de curvatura. Esta corresponde a 1 menos la tasa entre la longitud real de la vía y la longitud en línea recta desde el punto de inicio y fin del tramo homogéneo.

En la Figura 3-2 se presenta a manera de ejemplo una sección con las distintas categorías de tasa de curvatura y en la Tabla 3-11 se presentan las frecuencias globales de cada clasificación de tasa de curvatura. Para el rango de 0 % a 2 % de curvatura (TC1) se presentaron 59 % de tramos homogéneos, seguido de un 29 % para la curvatura de 2 % a 9 % (TC2), 9 % para el caso entre 9 % y 20 % (TC3), para la condición de 20 % a 33 % de curvatura se presentó en un 2 % y para el rango de 33 % hasta el máximo de 52 % de curvatura un 1 % de ocurrencia.

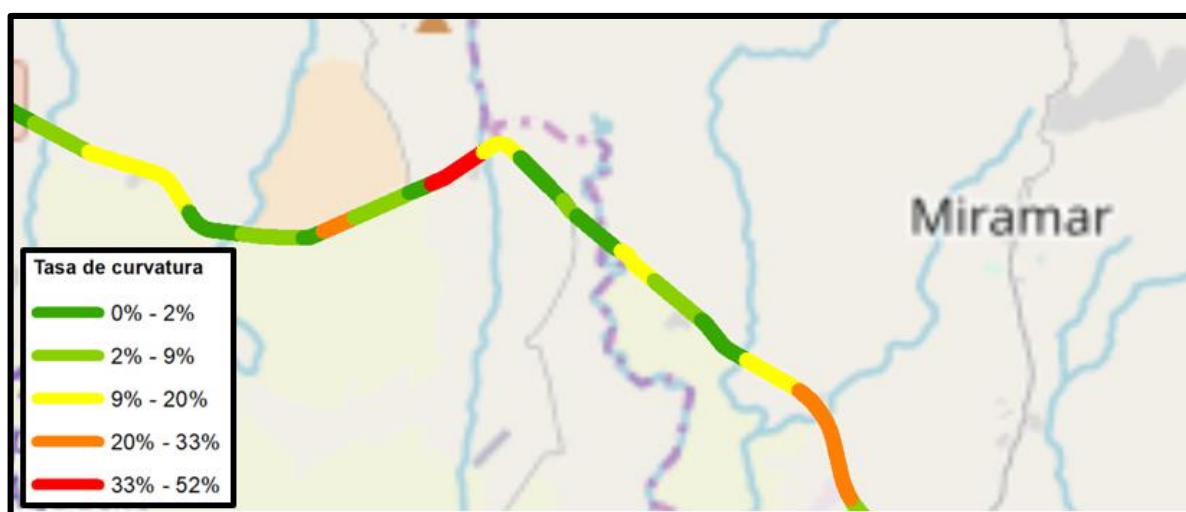


Figura 3-2. Tramos homogéneos categorizados por tasa de curvatura

3.2.2.10 Tasa de intersecciones por kilómetro

La cantidad de intersecciones por cada tramo homogéneo se incorporó mediante la estimación de una tasa de intersecciones por kilómetro, esto para ponderar el efecto según la longitud del segmento analizado. Fue calculada mediante la razón de la cantidad de intersecciones entre la longitud en kilómetros de cada tramo homogéneo. El valor máximo presente en la Tabla 3-7 es de 12 intersecciones por kilómetro con un valor promedio de 1,75, desviación estándar de 2,48 y un mínimo de 0.

Cabe destacar que el valor promedio más alto se presenta en el tramo 1, para un valor de 2,53 intersecciones por km en cada segmento homogéneo, sin embargo, el valor máximo de 12 se presenta en el tramo 3.

3.2.2.11 Deflectometría de impacto (FWD)

Para añadir una variable representativa de la capacidad estructural de la carpeta de rodamiento en el modelo, se incorporó el promedio de la deflectometría de impacto (FWD) del geófono 0 para cada tramo homogéneo. La información se obtuvo de la base de datos utilizada en el Informe del estado de la red vial nacional pavimentada 2012- 2013, generado por la Unidad de Gestión de la Red Vial Nacional (UGERVN) – PITRA – LanammeUCR.

El uso del valor asociado al geófono 0 radica en que este constituye una deflexión representativa de toda la estructura de pavimento. En la Tabla 3-7 se observa un valor máximo de $145 \cdot 10^{-2}$ mm, valor considerablemente alto, así como un valor promedio de $54 \cdot 10^{-2}$ mm que se considera como moderado y un mínimo de $6 \cdot 10^{-2}$ mm, tipificado como una deflexión baja.

A nivel de tramo, el valor promedio menor se presenta en el tramo 1, con $26,47 \cdot 10^{-2}$ mm y el mayor en el tramo 2 con $62,80 \cdot 10^{-2}$ mm, sin embargo, el tramo 3 presenta el valor máximo más alto de los 3 tramos con un valor de $145,05 \text{ mm} \times 10^{-2}$.

3.2.2.12 Índice de regularidad internacional (IRI)

Se incorporó el índice de regularidad internacional (IRI) en el modelo con el fin de contemplar la capacidad funcional de los tramos homogéneos. Este se interpreta como la regularidad de la vía, por lo que un valor cercano a 0 m/km se asocia a un estado óptimo y conforme aumenta hasta valores superiores a 3,6 m/km, se califica como deficiente.

Dado que el registro de la UGERVN contempla valores para el lado derecho e izquierdo del perfilómetro laser, se utilizó el promedio de ambos resultados. En la Tabla 3-7 se observa un valor máximo de 8,24 m/km, valor considerablemente alto, así como un valor promedio de 3,65 m/km que se considera como deficiente y un mínimo de 1,43 m/km, tipificado como una regularidad superficial buena.

A nivel de tramo, el valor promedio menor se presenta en el tramo 1, con 2,07 m/km y el mayor en el tramo 3 con 3,84 m/km adicionalmente, el tramo 3 presenta el valor máximo más alto de los 3 tramos con un valor de 8,24 m/km.

Capítulo 4 . Resultados

Para identificar los sitios más críticos a nivel de accidentabilidad, se aplicó el método de exceso de frecuencia de choques esperados con ajuste de Bayes completo, basado en las variables mencionadas en el Capítulo 3 y segmentado en choques totales y equivalentes, tomando como modelo de mayor confianza el de choques equivalentes.

Esta afirmación radica en que, al utilizar los choques equivalentes, se logra contemplar el efecto que tienen las distintas severidades de choques en la identificación de sitios críticos, condición que no siempre es representativa al utilizar únicamente los choques totales.

De forma complementaria se aplicaron los siguientes métodos para comparar los resultados de las estimaciones:

- Frecuencia de choques
- Tasa de choques
- Tasa crítica de choques
- Frecuencia promedio para choques equivalente a solo daños de propiedad (EPDO)
- Exceso de frecuencia de choques esperado con el ajuste de Bayes Empírico

A continuación, se presentan los diversos métodos utilizados de forma independiente, del más simple hasta el más complejo y, posterior a los incisos específicos por método, se presenta una comparación de cada uno de los métodos utilizados contra los resultados del ajuste de Bayes completo con choques equivalentes.

Cabe destacar que, en los métodos de frecuencia de choques, tasa de choques y EPDO, el factor que multiplica el “umbral (I_t)” o parámetro de corte es escogido por el analista y se encuentra sujeto a restricciones económicas, por lo que únicamente se analizaron los efectos de un factor de 1 y 2 como análisis de sensibilidad.

4.1 Frecuencia de choques

Se segmentaron los resultados del método de frecuencia de choques para la condición con choques totales y equivalentes, así como la variación del umbral multiplicado por un factor de 1 y de 2.

4.1.1 Choques totales

En la Tabla 4-1 se presentan los resultados del método de frecuencia de choques con choques totales. De este se observa la variación de sitios críticos al elevar el umbral, entre el It_1 e It_2 , con 147 y 60 sitios críticos respectivamente.

Tabla 4-1. Resumen de resultados: Frecuencia de choques con choques totales

Tramo	Tramos homogéneos	Frecuencia promedio (frp)	It_1	Segmentos críticos	It_2	Segmentos críticos
1	20	119	119	10	238	1
2	75	16	16	25	32	10
3	283	5	5	112	10	49
Total	378	-	-	147	-	60

4.1.2 Choques equivalentes

En la Tabla 4-2 se presentan los resultados del método de frecuencia de choques con choques equivalentes. De este se observa la variación de sitios críticos al elevar el umbral, entre el It_1 e It_2 , con 146 y 56 sitios críticos respectivamente.

Tabla 4-2. Resumen de resultados: Frecuencia de choques con choques equivalentes

Tramo	Tramos homogéneos	Frecuencia promedio (frp)	It_1	Segmentos críticos	It_2	Segmentos críticos
1	20	185	185	10	370	1
2	75	37	37	26	74	10
3	283	15	15	110	30	45
Total	378	-	-	146	-	56

Al comparar los resultados de la Tabla 4-1 y Tabla 4-2 se evidencia el efecto de considerar de forma indirecta la severidad del choque y la sensibilidad de resultados al variar el factor aplicado al umbral.

Al contrastar los segmentos críticos, sin tomar en consideración la priorización, para el caso It_1 con choques totales y equivalentes, 115 sitios coinciden en ambos casos, equivalente a 78,77 % de coincidencias. En el caso con It_2 , solo 36 segmentos coinciden entre ambos casos, equivalente a un 64,29 % de coincidencias. Esto implica que al aumentar el umbral las coincidencias de segmentos decrecen.

4.2 Tasa de choques

Se segmentaron los resultados del método de tasa de choques para la condición con choques totales y equivalentes, así como la variación del umbral multiplicado por un factor de 1 y de 2.

4.2.1 Choques totales

En la Tabla 4-3 se presentan los resultados del método de tasa de choques con choques totales. De este se observa la variación de sitios críticos al elevar el umbral, entre el It_1 e It_2 , con 141 y 41 segmentos críticos respectivamente.

Tabla 4-3. Resumen de resultados: Tasa de choques con choques totales

Tramo	Tramos homogéneos	Tasa de acc. promedio (Rrp)	It_1	Segmentos críticos	It_2	Segmentos críticos
1	20	1,90	1,90	7	3,81	4
2	75	0,87	0,87	26	1,75	3
3	283	0,68	0,68	108	1,37	34
Total	378	-	-	141	-	41

4.2.2 Choques equivalentes

En la Tabla 4-4 se presentan los resultados del método de tasa de choques con choques equivalentes. De este se observa la variación de sitios críticos al elevar el umbral, entre el It_1 e It_2 , con 131 y 55 segmentos críticos respectivamente.

Tabla 4-4. Resumen de resultados: Tasa de choques con choques equivalentes

Tramo	Tramos homogéneos	Tasa de acc. promedio (Rrp)	It_1	Segmentos críticos	It_2	Segmentos críticos
1	20	2,96	2,96	6	5,92	4
2	75	2,06	2,06	30	4,12	7
3	283	1,95	1,95	95	3,90	44
Total	378	-	-	131	-	55

Al comparar los resultados de la Tabla 4-3 y Tabla 4-4 se evidencia el efecto de considerar de forma indirecta la severidad del choque y la sensibilidad de resultados al variar el factor aplicado al umbral.

Al contrastar los segmentos críticos, sin tomar en consideración la priorización, para el caso It_1 con choques totales y equivalentes, 102 sitios coinciden en ambos casos, equivalente a

77,86 % de coincidencias. En el caso con It_2 , solo 24 segmentos coinciden entre ambos casos, equivalente a un 43,64 % de coincidencias.

Nuevamente se evidencia la tendencia observada en el método de frecuencia de choques, en la que al aumentar el umbral las coincidencias de segmentos decrecen, a pesar de que en la condición de choques equivalentes con It_2 se presente un aumento en la cantidad de sitios críticos con respecto al caso con choques totales.

4.3 Tasa crítica de choques

Se segmentaron los resultados del método de tasa crítica de choques para la condición con choques totales y equivalentes, ambos casos con un k de 1,282 asociado a un 90 % de confianza y de 1,645 correspondiente a 95 % de confianza.

4.3.1 Choques totales

En la Tabla 4-5 se presentan los resultados del método de tasa de choques con choques totales. De este se observa la variación de segmentos críticos al elevar el nivel de confianza de 90 % y 95 %, con 74 y 63 segmentos críticos respectivamente.

Tabla 4-5. Resumen de resultados: Tasa crítica de choques con choques totales

Tramo	Tramos homogéneos	Segmentos críticos (90 %)	Segmentos críticos (95 %)
1	20	6	6
2	75	16	15
3	283	52	42
Total	378	74	63

4.3.2 Choques equivalentes

En la Tabla 4-6 se presentan los resultados del método de tasa de choques con choques equivalentes. De este se observa la variación de segmentos críticos al elevar el nivel de confianza de 90 % y 95 %, con 96 y 91 segmentos críticos respectivamente.

Tabla 4-6. Resumen de resultados: Tasa crítica de choques con choques equivalentes

Tramo	Tramos homogéneos	Segmentos críticos (90 %)	Segmentos críticos (95 %)
1	20	6	6
2	75	22	20
3	283	68	65
Total	378	96	91

Al comparar los resultados de la Tabla 4-5 y Tabla 4-6 se evidencia el efecto de considerar de forma indirecta la severidad del choque y la sensibilidad de resultados al variar el factor k , asociado al nivel de confianza.

Al contrastar los segmentos críticos, sin tomar en consideración la priorización, para el caso con $k=90\%$ con choques totales y equivalentes, 51 segmentos coinciden en ambos casos, equivalente a $53,13\%$ de coincidencias. En el caso con $k=95\%$, solo 44 segmentos coinciden entre ambos casos, equivalente a un $48,35\%$ de coincidencias.

Las diferencias entre un $k=90\%$ y $k=95\%$ para el caso con choques equivalentes son leves, con 5 segmentos de diferencia, pero el efecto de analizar con choques equivalentes en vez de totales genera variaciones sustanciales, motivo que justifica la importancia de analizar la severidad de los eventos, en vez de solo cuantificar valores totales.

4.4 Índice EPDO

En la Tabla 4-7 se segmentaron los resultados del método EPDO tomando en consideración el umbral multiplicado por un factor de 1 y de 2. Por la particularidad del método al considerar las severidades de choques por medio de factores de equivalencia, la única diferencia entre umbrales es la cantidad de segmentos, sin variar la ubicación del segmento, sin embargo, en el caso con It_2 se presentan los casos más críticos entre ambos umbrales.

Tabla 4-7. Resumen de resultados: Índice equivalente de solo daños a la propiedad

Tramo	Tramos homogéneos	EPDO _{rp}	Umbral (It)	Cantidad	Umbral (It)	Cantidad
1	20	1,56	1,56	8	3,11	1
2	75	2,36	2,36	27	4,71	10
3	283	2,85	2,85	86	5,70	29
Total	378	-	-	121	-	40

4.5 Modelo binomial negativo

De forma preliminar se realizaron modelos binomiales negativos para cada tramo, segmentado en choques totales y choques equivalentes, esto con el fin de filtrar de forma inicial las variables, previo al uso de estadística Bayesiana.

Se procede a desglosar los modelos iniciales.

4.5.1 Modelo binomial negativo del tramo 1 con choques totales

En la Tabla 4-8 se presentan las variables significativas para el tramo 1 con choques totales, de los cuales se infiere:

Tabla 4-8. Modelo binomial negativo de choques totales para el tramo 1

Variable	Estimación	Error estándar	Z	Pr(> z)
Intercepto	-45,0952	7,1159	-6,337	2,34E-10
TPD	4,5043	0,6347	7,096	1,28E-12
ZLD2	-1,3988	0,2756	-5,075	3,89E-07
V80V90	-1,6029	0,2034	-7,88	3,26E-15
N6	-1,2584	0,2487	-5,06	4,20E-07
A2	0,6546	0,1656	3,953	7,70E-05

$\Theta=4,82$, Error estándar= 1,11, 2 x Log-Verosimilitud= -495,854

- El TPD presenta un coeficiente elevado de 4,5043, con una relación directamente proporcional con respecto a los choques, así como una significancia alta de 7,096. Esta condición es crítica al considerar que el tramo 1 cuenta con los valores de TPD más altos de la ruta.
- Las variables ZLD2, V80V90 (conjunto de velocidad 80 km/h y 90 km/h) y N6 presentan una relación inversamente proporcional con respecto a la ocurrencia de choques, con un alto valor de Z.
- Los datos implican menor riesgo o accidentabilidad al ampliarse la zona libre disponible, esto en comparación con el parámetro base ZLD1.
- Respecto a las velocidades, la tendencia inversa a velocidades reglamentarias altas esconde los problemas del tramo 1, en los que las zonas de menor velocidad (40 km/h y 60 km/h) presentan condiciones deficientes a nivel de seguridad, posiblemente por la presencia de intercambios con un limitado o inexistente carril de aceleración y/o desaceleración.
- La cantidad de carriles base fue de 4, contra la variable incorporada al modelo con 6 carriles, esta presenta una tendencia inversamente proporcional a la ocurrencia de choques. Esto responde a las deficiencias geométricas de la vía, en la cual los sitios aledaños a intercambios cuentan con 4 carriles, pero no con carriles de aceleración y desaceleración.

- La variable A2 presentó un coeficiente estimado de 0,6546, con un valor de Z de 3,953, está al ser directa indica que, para anchos menores a 3,5 m aumenta el riesgo contra la base que era de anchos de carril superiores a 3,5 m.

4.5.2 Modelo binomial negativo del tramo 1 con choques equivalentes

En la Tabla 4-9 se presentan las variables significativas para el tramo 1 con choques equivalentes, de los cuales se infieren las mismas observaciones indicadas para los resultados con choques totales.

Tabla 4-9. Modelo binomial negativo de choques equivalentes para el tramo 1

Variable	Estimación	Error estándar	Z	Pr(> z)
Intercepto	-45,3895	7,9939	-5,678	1,36E-08
TPD	4,5457	0,7127	6,378	1,80E-10
ZLD2	-1,3587	0,3191	-4,258	2,06E-05
V80V90	-1,4467	0,228	-6,345	2,23E-10
N6	-1,0762	0,2878	-3,74	0,000184
A2	0,7243	0,1896	3,82	0,000133

$\Theta=3,395$, Error estándar= 0,683, 2 x Log-Verosimilitud= -559,468

4.5.3 Modelo binomial negativo del tramo 2 con choques totales

En la Tabla 4-10 se presentan las variables significativas para el tramo 2 con choques totales, de los cuales se infiere:

Tabla 4-10. Modelo binomial negativo de choques totales para el tramo 2

Variable	Estimación	Error estándar	Z	Pr(> z)
Intercepto	-15,41278	2,6223	-5,878	4,16E-09
TPD	1,77093	0,26018	6,807	1,00E-11
ZLD2	-0,28422	0,11976	-2,373	0,0176
ZLD34	0,12283	0,15925	0,771	0,4405
V80	-0,58047	0,12947	-4,483	7,35E-06
V90	0,07436	0,21196	0,351	0,7257
A2	-0,30717	0,17621	-1,743	0,0813
A3	-0,33024	0,14183	-2,328	0,0199
A4	-0,0911	0,14528	-0,627	0,5306

$\Theta=3,293$, Error estándar= 0,596, 2 x Log-Verosimilitud= -1052,881

- El TPD presenta un coeficiente de 1,77093, con una relación directamente proporcional con respecto a los choques, así como una significancia alta. Esta condición es crítica al considerar el flujo vehicular del tramo 2, que a pesar de ser

menor al del tramo 1, cuenta con centros poblacionales importantes que propician un aumento en los viajes.

- La variable ZLD2 resultó significativa con un coeficiente negativo de -0,28422, análogo al tramo 1, implica un menor riesgo o accidentabilidad al ampliarse la zona libre disponible, esto en comparación con el parámetro base ZLD1.
- A nivel de velocidades se presenta el mismo comportamiento indicado en el tramo 1, en el cual la velocidad alta V80 presenta un coeficiente negativo, por lo que los tramos de velocidad reglamentaria de 60 km/h son los de mayor riesgo, influenciados por las radiales.
- En el caso del ancho de carril solo la variable A3 resultó significativa con un coeficiente de -0,33024 y un Z de -2,328, esto indica que un ancho superior a la base (3,5 – 3,7 m) reduce la exposición al riesgo. Esta afirmación se desprende del análisis estadístico, sin embargo, una vía con carriles anchos tiende a propiciar velocidades de operación superiores, asociadas a un mayor riesgo.

4.5.4 Modelo binomial negativo del tramo 2 con choques equivalentes

En la Tabla 4-11 se presentan las variables significativas para el tramo 2 con choques equivalentes, de los cuales se infiere:

Tabla 4-11. Modelo binomial negativo de choques equivalentes para el tramo 2

Variable	Estimación	Error estándar	Z	Pr(> z)
Intercepto	-13,07978	3,08012	-4,247	2,17E-05
TPD	1,52774	0,29967	5,098	3,43E-07
MRIprom	0,12858	0,06162	2,087	0,0369

$\Theta=0,9115$, Error estándar= 0,0975, 2 x Log-Verosimilitud= -1483,0710

- El TPD presenta el mismo comportamiento indicado para el caso con choques totales.
- La variable MRIprom presenta un coeficiente positivo, lo que implica que a mayor IRI, mayor riesgo. Un IRI bajo presenta mayor regularidad superficial, lo que implica una mejor adherencia de la rueda a la vía y mejor maniobrabilidad, sin embargo, un IRI bajo propicia mayores velocidades de operación, por lo que debe estudiarse en mayor detalle el efecto de la variable en la accidentabilidad.

4.5.5 Modelo binomial negativo del tramo 3 con choques totales

En la Tabla 4-12 se presentan las variables significativas para el tramo 3 con choques totales, de los cuales se infiere:

Tabla 4-12. Modelo binomial negativo de choques totales para el tramo 3

Variable	Estimación	Error estándar	Z	Pr(> z)
Intercepto	-6,643942	0,83082	-7,997	1,28E-15
TPD	0,843414	0,085175	9,902	< 2e-16
ZLD3	0,235599	0,099916	2,358	0,018375
ZLD4	0,260232	0,123428	2,108	0,034999
V60	-0,072805	0,13156	-0,553	0,579993
V80	-0,337592	0,149835	-2,253	0,024253
A1	-0,057693	0,157338	-0,367	0,713858
A2	0,26499	0,097775	2,71	0,006724
A3	-0,171253	0,176451	-0,971	0,331777
A4	-0,437236	0,279804	-1,563	0,118135
TC2	-0,484251	0,095772	-5,056	4,28E-07
TC3	-0,363453	0,125345	-2,9	0,003736
TC45	-0,983937	0,226473	-4,345	1,40E-05
Int.	0,521129	0,15305	3,405	0,000662
FWDprom	-0,004886	0,001609	-3,036	0,002397

$\Theta=2,410$, Error estándar= 0,312, 2 x Log-Verosimilitud= -2731,783

- Al igual que todos los modelos, el TPD es directamente proporcional a la ocurrencia de choques, sin embargo, en este caso pierde predominancia en su coeficiente, ya que presenta un valor menor a 1, pero cuenta con la significancia más alta de 9,902.
- Se estima que el comportamiento de las variables ZLD3 y ZLD4 es causado indirectamente por el efecto de la velocidad de operación, variable que no se pudo incorporar al modelo. La velocidad de operación aumenta al presentarse una condición de amplitud de la vía, condición que, ante zonas libres amplias acompañadas de pendientes bajas, propician una conducción a mayor velocidad. Cabe destacar que la velocidad reglamentaria no resultó significativa, ya que el señalamiento no es suficiente para generar una reducción en la velocidad si esta no se ve acompañada de un diseño que la propicie. Cabe destacar que el tramo 3 presenta un 60 % de sus datos con zonas libres amplias, acompañadas de pendientes bajas, por lo que propicia los efectos colaterales de la velocidad de operación en el modelo.
- La variable V80 presenta un coeficiente de -0.33759 y un Z de -2,253. La tendencia inversamente proporcional radica nuevamente en la presencia de centros poblacionales que generan reducciones de velocidad reglamentaria (base de 40 km/h) y las deficiencias en las transiciones e intersecciones.

- De las categorías de ancho de carril, únicamente la A2, asociada a anchos de 3,2 m – 3,5 m resultó significativa contra la base de 3,5 m – 3,7 m. Presenta una tendencia directa con un coeficiente de 0,26499 y una significancia superior al 95 %.
- Las variables asociadas a la curvatura de la vía TC2, TC3 y TC45 (conjunto de TC4 y TC5) presentan otro efecto colateral asociado a la velocidad de operación, ya que indica que el riesgo es mayor para los tramos con tasas de curvatura de 0 % - 2 %, condición que, al ser prácticamente rectilínea, propicia altas velocidades de operación.
- La variable intercambio resulta directamente proporcional a la ocurrencia de choques, esto a pesar de haber eliminado los choques asociados a intersecciones, por lo que las deficiencias geométricas en los accesos aumentan el riesgo en la vía, validadas con un valor de Z de 3,405.
- El tramo 3 es la sección con valores de FWDprom mayores, asociados a un estado estructural de la vía deficiente, sin embargo, a nivel de seguridad vial, propician la reducción de la accidentabilidad con un coeficiente negativo y un Z alto.

4.5.6 Modelo binomial negativo del tramo 3 con choques equivalentes

En la Tabla 4-13 se presentan las variables significativas para el tramo 2 con choques equivalentes, de los cuales se infieren las mismas observaciones indicadas para los resultados con choques totales.

Tabla 4-13. Modelo binomial negativo de choques equivalentes para el tramo 3

Variable	Estimado	Error estándar	Z	Pr(> z)
Intercepto	-7,0673	0,974162	-7,255	4,02E-13
TPD	1,009148	0,1047	9,638	< 2e-16
ZLD3	0,212624	0,142641	1,491	0,13606
ZLD4	0,595482	0,173376	3,435	0,000593
A1	-0,328307	0,24365	-1,347	0,177834
A2	-0,015532	0,136434	-0,114	0,909364
A3	-0,665438	0,247477	-2,689	0,007169
A4	0,025678	0,348443	0,074	0,941254
TC2	-0,571322	0,132924	-4,298	1,72E-05
TC3	-0,139318	0,188627	-0,739	0,460156
TC45	-0,838678	0,31547	-2,659	0,007849
FWDprom	-0,005316	0,002179	-2,44	0,014696

$\Theta=0,4554$, Error estándar= 0,0282, 2 x Log-Verosimilitud= -4134,483

4.6 Exceso de frecuencia de choques esperado con ajuste de Bayes empírico

Basado en los resultados de las regresiones binomiales negativas, se generaron los modelos de exceso de frecuencia de choques esperado con ajuste de Bayes empírico, segmentado por tramo y tipo de choque considerado. En la Tabla 4-14 se presenta la cantidad de segmentos con excesos de frecuencia positivos para cada tramo y tipo de choque utilizado.

Tabla 4-14. Comparación de segmentos críticos con exceso de frecuencia de choques esperado con ajuste de Bayes empírico por tramo

Tramo	Tramos homogéneos	Segmentos críticos	
		<i>Choques totales</i>	<i>Choques equivalentes</i>
1	20	10	10
2	75	35	31
3	283	115	74
Total	378	160	115

Al analizar los resultados de la Tabla 4-14 se evidencia el efecto de considerar de forma indirecta la severidad del choque, con una reducción de 45 sitios o un 28,1 % de los sitios evidenciados con choques equivalentes con respecto al total de choques totales.

Al contrastar los segmentos críticos o con exceso de frecuencia de choques positivo con choques totales y equivalentes, sin tomar en consideración la priorización, 95 sitios coinciden en ambos casos, equivalente a 84,35 % de coincidencias, tomando como referencia los 115 segmentos críticos identificados con el modelo de choques equivalentes.

En la Tabla 4-15,

Tabla 4-16 y Tabla 4-17 se presenta el 10% de los segmentos críticos por tramo, ordenados según el mayor exceso de frecuencia de choques esperados y segmentados según el tipo de choques utilizado en el análisis estadístico. En el caso específico de la Tabla 4-15, el 10% corresponde a solo los primeros 2 segmentos, sin embargo, para casos de comparaciones futuras se presenta el total de 20 segmentos.

Tabla 4-15. Jerarquización de segmentos según exceso de frecuencia del tramo 1, obtenidos con el método de exceso de frecuencia de choques esperado con ajuste de Bayes empírico

Choques totales		Choques equivalentes	
Segmento	Exceso de frecuencia de choques	Segmento	Exceso de frecuencia de choques
5	31,70	7	75,78
11	29,91	18	43,14
7	28,68	15	42,74
13	6,88	5	40,61
19	5,25	11	26,05
4	5,12	4	14,22
16	4,82	12	10,88
10	4,74	16	8,37
14	3,80	13	7,20
18	0,66	10	2,92
12	-1,89	3	-9,25
17	-3,44	17	-9,81
20	-4,68	14	-10,54
2	-5,51	2	-11,73
3	-6,08	20	-11,82
15	-7,71	19	-19,32
1	-15,10	1	-25,06
6	-15,83	6	-26,32
8	-26,52	9	-62,37
9	-32,41	8	-66,74

Tabla 4-16. Jerarquización de segmentos según exceso de frecuencia del tramo 2, obtenidos con el método de exceso de frecuencia de choques esperado con ajuste de Bayes empírico

Choques totales		Choques equivalentes	
Segmento	Exceso de frecuencia de choques	Segmento	Exceso de frecuencia de choques
22	17,66	59	48,50
32	14,15	62	35,65
37	10,71	34	35,59
43	6,05	31	33,81
59	5,70	29	33,10
27	5,30	22	30,72
60	3,22	79	30,14
86	2,79	32	30,11
29	2,42	37	27,64

Tabla 4-17. Jerarquización de segmentos según exceso de frecuencia del tramo 3, obtenidos con el método de exceso de frecuencia de choques esperado con ajuste de Bayes empírico

Choques totales		Choques equivalentes	
Segmento	Exceso de frecuencia de choques	Segmento	Exceso de frecuencia de choques
209	5,36	209	46,53
295	5,32	193	43,62
182	5,03	280	36,78
172	5,01	258	35,82
179	4,96	134	35,44
186	3,30	318	33,15
177	3,23	237	32,88
176	2,62	290	31,27
193	2,55	235	30,94
185	2,49	167	21,16
279	2,27	240	20,48
268	2,25	244	17,72
247	2,25	202	16,49
217	1,81	181	14,54
161	1,81	166	13,77
194	1,80	177	13,42
266	1,80	179	13,09
212	1,70	185	12,90
134	1,49	172	11,90
258	1,37	207	11,86
200	1,37	132	11,71
288	1,37	200	11,62
121	1,33	186	11,40
181	1,33	164	11,28
192	1,31	176	11,28
222	1,30	302	11,19
227	1,28	286	10,48
180	1,24	103	10,39

4.7 Exceso de frecuencia de choques esperado con ajuste de Bayes completo

Basado en las variables que resultaron significativas para el modelo binomial negativo, se realizó la estimación de modelos Poisson Log Normal por medio del análisis bayesiano con el cual se estimó el exceso de frecuencia de choques esperado con ajuste de Bayes completo.

Para todos los modelos se alcanzó una relación del error de Markov entre la desviación estándar menor a 5 %, parámetro que permite asegurar un buen nivel de convergencia.

Para identificar la exposición al riesgo de cada tramo con respecto a la variación de cada variable, se estimó la frecuencia de choques esperado por kilómetro para cada tramo y modelo generado con el método de Bayes completo, o función de desempeño.

Se procede a desglosar los modelos por tramo, choques totales y equivalentes, así como la comparación de resultados.

4.7.1 Modelo del tramo 1 con choques totales

En la Tabla 4-18 se presentan las variables significativas para el tramo 1 con choques totales, con las cuales se obtiene la Ecuación 4-1:

$$N = e^{\beta_{\text{intercepto}}} * L * \text{TPD}^{\beta_{\text{TPD}}} * e^{\beta_{V80V90} * V80V90} \quad \text{Ecuación 4-1}$$

donde:

N: Número de choques esperados

L: Longitud del segmento

β_i : Coeficiente asociado a cada variable del modelo

El TDP presentó un coeficiente estimado alto de 2,7650, condición crítica al valorar que el tramo 1 es el que cuenta con los registros de TPD más altos de la ruta. El efecto del coeficiente se evidencia al evaluar el TPD en la Ecuación 4-1, lo que permitió identificar la variación de frecuencia de choques por km presente en la Figura 4-1.



Figura 4-1. Variación de la frecuencia de choques esperado por km con respecto al TPD, basado en modelo bayesiano completo con choques totales del tramo 1

Al analizar la variación de la frecuencia de choques esperados con respecto al TPD, es evidente la tendencia exponencial del riesgo en función al TPD y la influencia que tiene la variable en la accidentabilidad.

Esta condición se evidencia al utilizar como base el TPD mínimo registrado de 69410 vehículos/día y comparándolo con el valor máximo registrado de 96765 vehículos/día, lo que genera un aumento en la exposición al riesgo del 150,60%.

Al observar los resultados de Castro y Agüero (2013) y Varela y Agüero (2016) para la Ruta Nacional 32 y Ruta Nacional 34 de Costa Rica, se replica el coeficiente asociado al TPD positivo, pero con una magnitud menor a 1.

Para el caso específico de la Ruta Nacional 1, el TPD de la vía asciende a valores cercanos a los 100000 vehículos/día, por lo que el coeficiente evidenciado responde al registro de choques, donde un 46,87% del total se ubican en el tramo 1, sección con el mayor TPD de la vía.

Para el caso de la velocidad reglamentaria V80V90, el signo negativo se asocia al riesgo de los accesos e intercambios que presentan condiciones geométricas deficientes, sitios donde la velocidad base de 60 km/h es dominante. Wang, Ivan, Ravishanker y Jackson (2017) evidenciaron un comportamiento similar en el cual la velocidad reglamentaria alta generó

reducciones en los choques con múltiples vehículos, pero acotan que esta generó aumento de los choques individuales.

Al evaluar la variable de velocidad en la Ecuación 4-1 se obtuvo una frecuencia de choques/km de 81,93 para la velocidad V40V60 y de 32,64 para la velocidad V80V90. Según las características del tramo 1, donde la velocidad reglamentaria V40V60 se presenta en tramos con accesos sin transiciones apropiadas ni carriles de aceleración o desaceleración, el efecto de transitar en zonas de mayor velocidad reglamentaria (V80V90), pero sin accesos, implica una reducción en el riesgo del 60,16%.

Tabla 4-18. Modelo de exceso de frecuencia de choques esperados con ajuste de Bayes completo con choques totales para el tramo 1

Variable	Estimación	Desv. Est.	Intervalo de confianza 95 %			
			2,5%	5,0%	95,0%	97,5%
Intercepto	-26,7600	10,6600	-47,22	-43,97	-8,919	-5,273
TPD	2,7650	0,9557	0,8409	1,168	4,309	4,597
V80V90	-0,9203	0,4143	-1,696	-1,578	-0,2292	-0,0759
Desviación Estándar	0,7234	0,0676	0,6091	0,6245	0,8424	0,8727
Varianza	0,6300	0,2418	0,3116	0,3422	1,08	1,226

$$\bar{D} = 426,1 ; D(\bar{\theta}) = 405,9 ; DIC = 446,3 ; p_D = 20,2$$

4.7.2 Modelo del tramo 1 con choques equivalentes

En la Tabla 4-19 se presentan las variables significativas para el tramo 1 con choques equivalentes, con las cuales se obtiene la Ecuación 4-2:

$$N = e^{\beta_{intercepto}} * L * TPD^{\beta_{TPD}} * e^{\beta_{V80V90} * V80V90} \quad \text{Ecuación 4-2}$$

donde:

N: Número de choques esperados

L: Longitud del segmento

β_i : Coeficiente asociado a cada variable del modelo

En general presenta la misma tendencia analizada para el caso con choques totales, sin embargo, el coeficiente asociado al TPD aumenta sustancialmente, pasando de 2,765 a 6,887 al considerar la severidad de los choques.

Esta condición se evidencia al utilizar como base el TPD mínimo registrado de 69410 vehículos/día y comparándolo con el valor máximo registrado de 96765 vehículos/día, lo que genera un aumento en la exposición al riesgo del 885,75%.



Figura 4-2. Variación de la frecuencia de choques esperado por km con respecto al TPD, basado en modelo bayesiano completo con choques equivalentes del tramo 1

Al analizar la velocidad reglamentaria, se presentó una frecuencia de choques/km de 186,29 para la velocidad V40V60 y de 42,49 para la velocidad V80V90, valores análogos a los registrados para el modelo con choques totales. Sin embargo, el efecto de viajar en las zonas de mayor velocidad (V80V90) genera una reducción en la accidentabilidad del 77,19%, superior a la evidenciada en el modelo con choques totales.

Tabla 4-19. Modelo de exceso de frecuencia de choques esperados con ajuste de Bayes completo con choques equivalentes para el tramo 1

Variable	Estimación	Desv. Est.	Intervalo de confianza 95 %			
			2,5%	5,0%	95,0%	97,5%
Intercepto	-72,4000	8,7830	-89,85	-87,12	-58,13	-55,53
TPD	6,8870	0,7864	5,377	5,609	8,203	8,448
V80V90	-1,4780	0,4094	-2,316	-2,165	-0,8263	-0,6932
Desviación Estándar	0,7409	0,0602	0,6404	0,6539	0,8459	0,8745
Varianza	0,6541	0,2432	0,33	0,3615	1,111	1,257

$\bar{D} = 586,4$; $D(\bar{\theta}) = 565,9$; $DIC = 606,9$; $p_D = 20,51$

4.7.3 Modelo del tramo 2 con choques totales

En la Tabla 4-20 se presentan las variables significativas para el tramo 2 con choques totales, con las cuales se obtuvo la Ecuación 4-3:

$$N = e^{\beta_{intercepto}} * L * TPD^{\beta_{TPD}} * e^{\beta_{V80} * V80} * e^{\beta_{V90} * V90} \quad \text{Ecuación 4-3}$$

donde:

N: Número de choques esperados

L: Longitud del segmento

β_i : Coeficiente asociado a cada variable del modelo

La Figura 4-3 permite analizar la variación de la frecuencia de choques esperados con respecto al TPD, donde nuevamente la tendencia es de tipo exponencial. Al contrastar el riesgo al presentarse el TPD mínimo de 22215 vehículos/día, contra el más alto del tramo de 75546 vehículos/día, la exposición al riesgo aumenta un 962,80%, condición que evidencia el impacto de la variable sobre el riesgo, correspondiente a un coeficiente de 1,931.



Figura 4-3. Variación de la frecuencia de choques esperado por km con respecto al TPD, basado en modelo bayesiano completo con choques totales del tramo 2

En la Figura 4-4 se repite el análisis, pero para la variable de velocidad reglamentaria, utilizando como velocidad reglamentaria base 60 km/h. Las reducciones en la frecuencia de choques esperado por km en la velocidad de 80 km/h sustenta el supuesto de que el efecto de los intercambios o accesos a centros poblacionales en la vía aumentan el riesgo al estar mal canalizados, ya que a 80 km/h se presenta una reducción del riesgo del 45,15%. Cabe destacar que la variable asociada a la velocidad reglamentaria de 90 km/h no resultó significativa para el modelo.

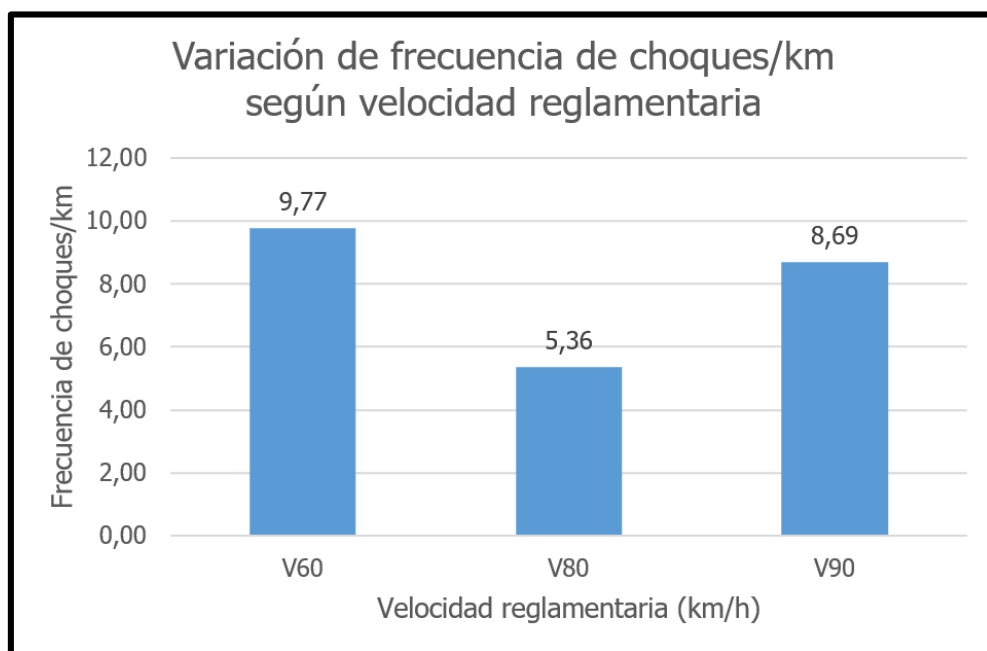


Figura 4-4. Variación de la frecuencia de choques esperado por km con respecto a la velocidad reglamentaria, basado en modelo bayesiano completo con choques totales del tramo 2

Esta condición es opuesta a la registrada por Miranda, Labbe y Fu (2007) al utilizar la velocidad reglamentaria como variable continua y estimar mediante un modelo jerárquico Poisson Log Normal un coeficiente positivo, sin embargo, las condiciones geométricas y funcionales del tramo justifican el comportamiento observado. Se asumió que estas condiciones radican en las zonas de velocidad reglamentaria de 60 km/h donde se presentan intercambios sin carriles de aceleración y desaceleración, así como la conexión de la Ruta Nacional 1 con centros poblacionales importantes, condición que genera un flujo vehicular importante en las vías secundarias.

Tabla 4-20. Modelo de exceso de frecuencia de choques esperados con ajuste de Bayes completo con choques totales para el tramo 2

Variable	Estimación	Desv. Est.	Intervalo de confianza 95 %			
			2,5%	5,0%	95,0%	97,5%
Intercepto	-17,4700	4,1800	-25,92	-24,46	-10,73	-9,454
TPD	1,9310	0,4141	1,139	1,263	2,624	2,766
V80	-0,6006	0,2014	-0,998	-0,933	-0,272	-0,210
V90	-0,1164	0,3361	-0,791	-0,674	0,427	0,536
Desviación Estándar	0,5933	0,0457	0,5091	0,5217	0,6713	0,6883
Varianza	0,3811	0,0841	0,2451	0,2616	0,5324	0,5725

$\bar{D} = 895,4$; $D(\bar{\theta}) = 839,2$; $DIC = 951,7$; $p_D = 56,26$

4.7.4 Modelo del tramo 2 con choques equivalentes

En la Tabla 4-21 se presentan las variables significativas para el tramo 2 con choques equivalentes, con las cuales se obtuvo la Ecuación 4-4:

$$N = e^{\beta_{intercepto}} * L * TPD^{\beta_{TPD}} * e^{\beta_{MRIprom} * MRIprom} \quad \text{Ecuación 4-4}$$

donde:

N: Número de choques esperados

L: Longitud del segmento

β_i : Coeficiente asociado a cada variable del modelo

Al evaluar el TPD en la Ecuación 4-4 se identificó la variación de frecuencia de choques por km presente en la Figura 4-5, donde la tendencia es de tipo exponencial. Al contrastar el riesgo al presentarse el TPD mínimo de 22215 vehículos/día, contra el más alto del tramo de 75546 vehículos/día, la exposición al riesgo aumenta un 2106,97%, condición que evidencia el efecto de incorporar indirectamente la severidad de los choques.

A pesar de que los porcentajes esconden la magnitud de los valores de frecuencia de choques calculados, es evidente el impacto de la variable sobre el riesgo, correspondiente a un coeficiente de 2,528, tan solo 0,597 superior al coeficiente obtenido en el modelo de choques totales, pero genera un aumento cercano al doble en la exposición al riesgo.

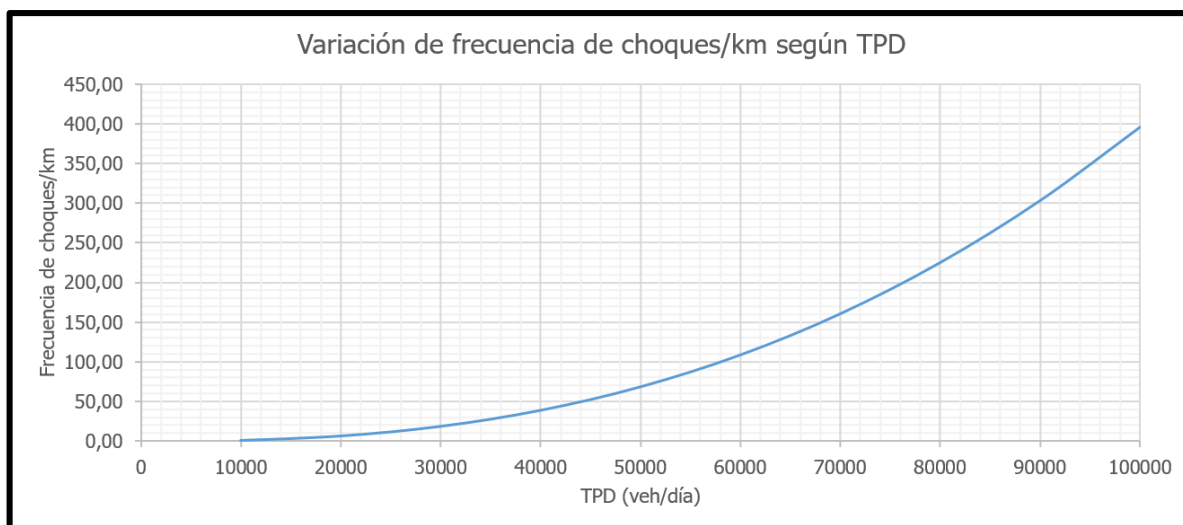


Figura 4-5. Variación de la frecuencia de choques esperado por km con respecto al TPD, basado en modelo bayesiano completo con choques equivalentes del tramo 2

La variable MRIprom se mantiene significativa y con un coeficiente positivo, al igual que para el modelo binomial negativo. La tendencia observada fue replicada previamente por Chan, Huang, Yan y Richards (2010), donde el coeficiente asociado resultó significativo y positivo.

En la Figura 4-6 se repite el análisis para la variable MRIprom, donde la frecuencia de choques/km aumenta constantemente a una tasa de 15,03% al aumentar en una unidad el valor de MRIprom.

Al comparar los resultados de evaluar el MRIprom mínimo registrado en el tramo, de 1,69 m/km y máximo de 6,66 m/km, el aumento en la exposición al riesgo es de 100,53%, lo que evidencia el efecto del MRIprom sobre la accidentabilidad. Análogo al efecto asociado al confort identificado por Hu, Gao, Wang y Sun (2017), concluyen que un valor mayor de IRI recarga la labor de conducción al reducir el confort y aumenta el riesgo.

Sin embargo, Buddhavarapu, Banerjee y Prozzi (2013) compararon el IRI con la severidad de los choques y evidenciaron que las vías con menor IRI registraron una mayor tasa de accidentabilidad para choques viales de mayor severidad, efecto del aumento en la velocidad de operación y del confort.

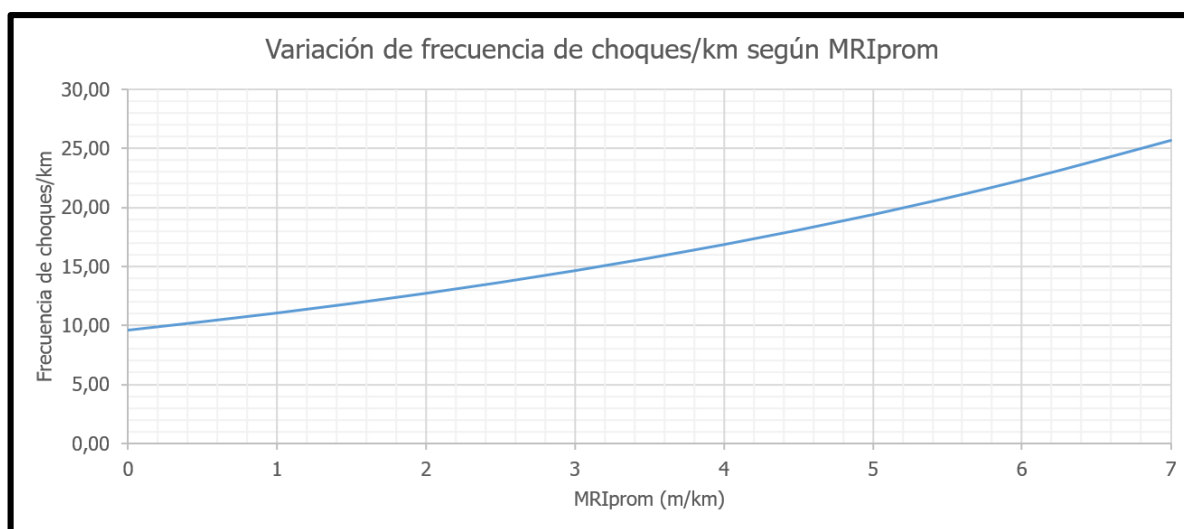


Figura 4-6. Variación de la frecuencia de choques esperado por km con respecto a la velocidad reglamentaria, basado en modelo bayesiano completo con choques equivalentes del tramo 2

Tabla 4-21. Modelo de exceso de frecuencia de choques esperados con ajuste de Bayes completo con choques equivalentes para el tramo 2

Variable	Estimación	Desv. Est.	Intervalo de confianza 95 %			
			2,5%	5,0%	95,0%	97,5%
Intercepto	-23,59	4,029	-31,67	-30,3	-17,06	-15,82
TPD	2,528	0,3911	1,777	1,894	3,181	3,312
MRIprom	0,14	0,08147	-0,0192	0,00742	0,2752	0,3008
Desviación Estándar	0,7984	0,04976	0,7092	0,7219	0,8851	0,9044
Varianza	0,6672	0,1381	0,4459	0,4726	0,916	0,9827

$\bar{D} = 2063$; $D(\bar{\theta}) = 1995$; $DIC = 2131$; $p_D = 67,93$

4.7.5 Modelo del tramo 3 con choques totales

En la Tabla 4-22 se presentan las variables significativas para el tramo 3 con choques totales, con los cuales se obtuvo la Ecuación 4-5:

$$N = e^{\beta_{intercepto}} * L * TPD^{\beta_{TPD}} * e^{\beta_{Int} * Int} * e^{\beta_{FWDprom} * FWDprom} \\ * e^{\beta_{TC2} * TC2} * e^{\beta_{TC3} * TC3} * e^{\beta_{TC45} * TC45} * e^{\beta_{A1} * A1} * e^{\beta_{A2} * A2} \\ * e^{\beta_{A3} * A3} * e^{\beta_{A4} * A4} * e^{\beta_{ZLD3} * ZLD3} * e^{\beta_{ZLD4} * ZLD4}$$

Ecuación 4-5

donde:

N: Número de choques esperados

L: Longitud del segmento, evaluada como 1 km

β_i : Coeficiente asociado a cada variable del modelo

Al igual que todos los modelos, el TPD es directamente proporcional a la ocurrencia de choques, sin embargo, en este caso pierde predominancia en su coeficiente al incluirse una mayor cantidad de variables explicativas.

La Figura 4-7 permite analizar la variación de la frecuencia de choques esperados con respecto al TPD y resalta que la tendencia exponencial evidenciada en el Tramo 1 y Tramo 2 cambia a una tendencia lineal, con un crecimiento promedio de 1,57 choques/km por cada 10000 vehículos/día.

A pesar de que el modelo presenta el menor coeficiente asociado al TPD de todos los escenarios analizados, la diferencia en la exposición al riesgo entre el TPD mínimo registrado de 2319 vehículos/día y el TPD máximo de 24575 vehículos/día es de 899,47%.

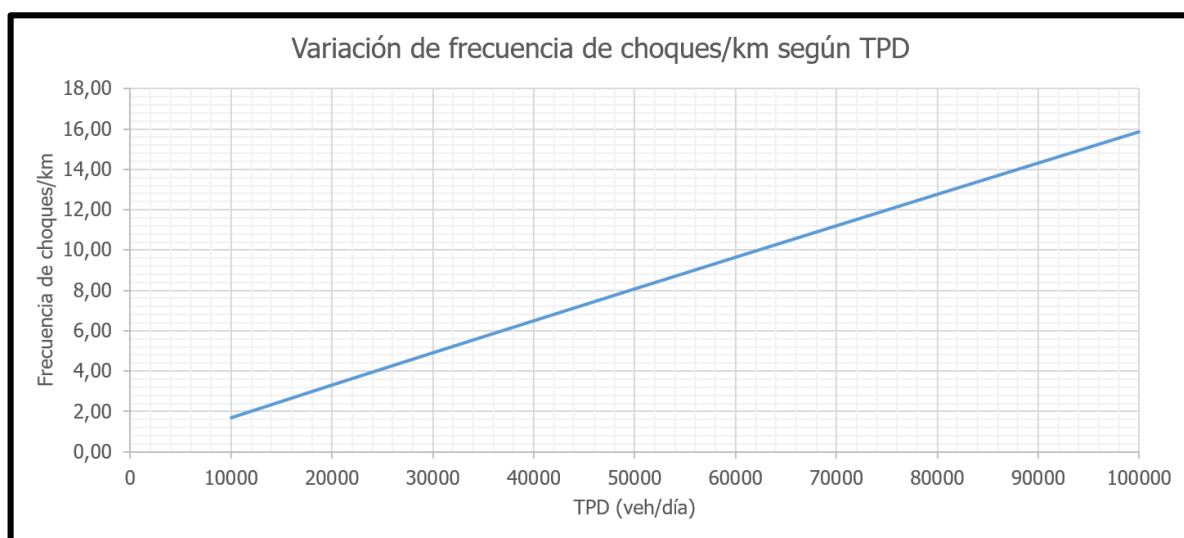


Figura 4-7. Variación de la frecuencia de choques esperado por km con respecto al TPD, basado en modelo bayesiano completo con choques totales del tramo 3

De las categorías de ancho de carril únicamente la A2, asociada a anchos de 3,2 m – 3,5 m resultó significativa contra la base de 3,5 m – 3,7 m. Esto implica que, a menor ancho de

carril, mayor el riesgo o posibilidad de un choque vial, asociado a un coeficiente 0,3302 y una significancia superior al 95 %. Esta generó el comportamiento esperado en la exposición al riesgo, ya que, como se visualiza en la Figura 4-8 y Figura 4-9 el ancho A2 presenta mayor cantidad de frecuencia de choques esperados/km con respecto al escenario base A0 (ancho de 3,5m – 3,7m), con un aumento de exposición al riesgo de 39,12%.

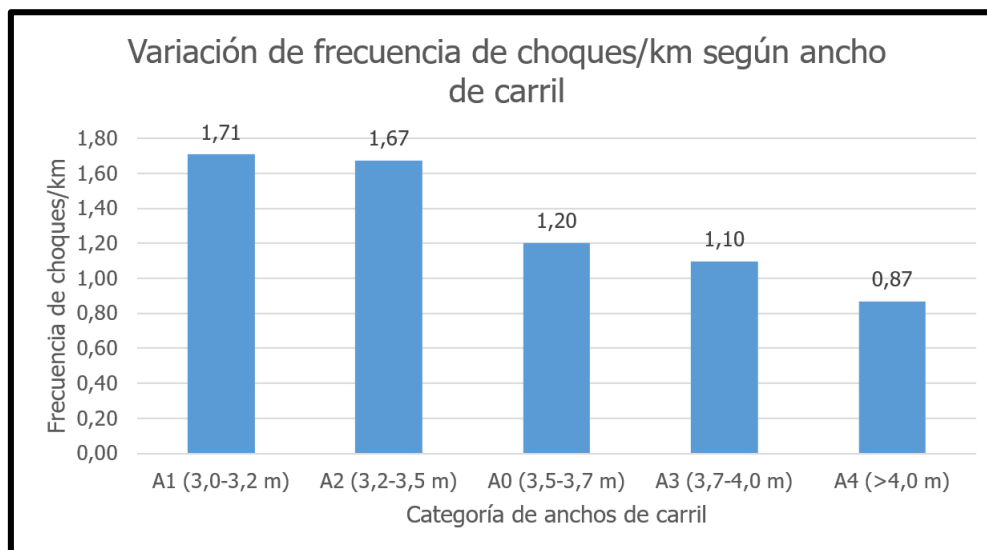


Figura 4-8. Variación de la frecuencia de choques esperado por km con respecto al ancho de carril, basado en modelo bayesiano completo con choques totales del tramo 3

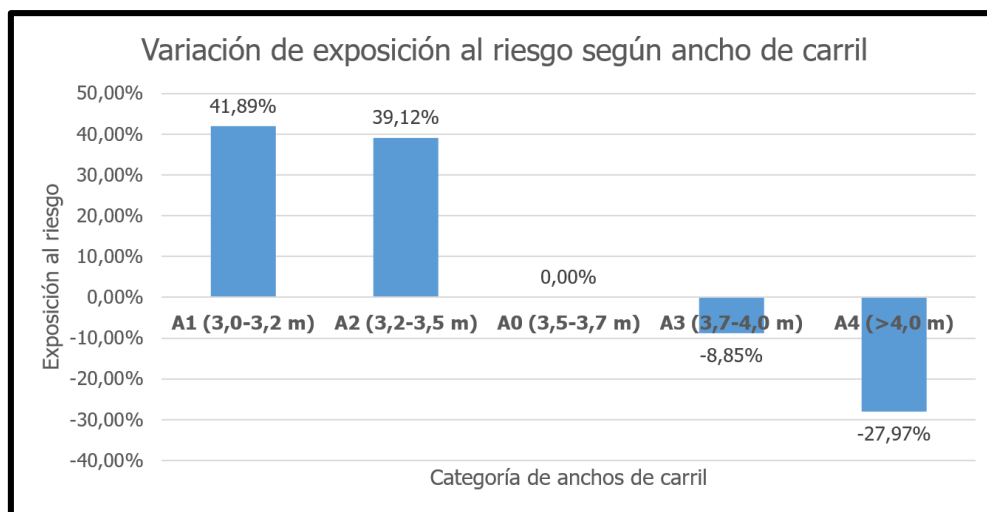


Figura 4-9. Variación de exposición al riesgo con respecto al ancho de carril, basado en modelo bayesiano completo con choques totales del tramo 3

La significancia de esta variable radica en contar con variabilidad en los datos, condición que Agüero (2013) obtuvo al contar con 5 categorías de anchos de carril, sin embargo, Elvik (2009), posterior a múltiples comparaciones, indica que el efecto de aumento o reducción del riesgo ante cambios en el ancho de carril es aleatorio. Este comportamiento aleatorio se evidencia en el análisis multivariado de Wang, Ivan, Ravishanker y Jackson (2017), donde el signo del coeficiente de ancho de carril varía según las categorías de choques, a pesar de contar con la misma base de datos para los modelos.

Las variables asociadas a la curvatura de la vía TC2, TC3 y TC45 (conjunto de TC4 y TC5) presentan otro efecto colateral asociado a la velocidad de operación, ya que indica que el riesgo es mayor para los tramos con tasas de curvatura de 0 % - 2 %, condición que propicia altas velocidades de operación. Guadamuz y Agüero (2017) utilizaron de forma indirecta la curvatura mediante una variable dummy que indicó la presencia de curva, condición que registró un coeficiente positivo en la presencia de curva, comportamiento típicamente esperado.

En la Figura 4-10 y Figura 4-11 se evidencian los resultados al evaluar las distintas categorías de tasa de curvatura, medida indirecta del radio en la vía. Al analizar los valores de frecuencia de choques/km se presenta una tendencia generalizada hacia la reducción al aumentar la tasa de curvatura, lo que se interpretó como un efecto colateral de la velocidad de operación, así como del confort de conducir en tramos curvos.

Al detallar el porcentaje de variación a la exposición del riesgo, utilizando como base la condición TC1 con una tasa de curvatura entre 0 % y 2%, la mayor reducción se presenta para la categoría T45, correspondiente a una tasa de curvatura entre 20% y 52%, con una reducción del riesgo de 62,61%.

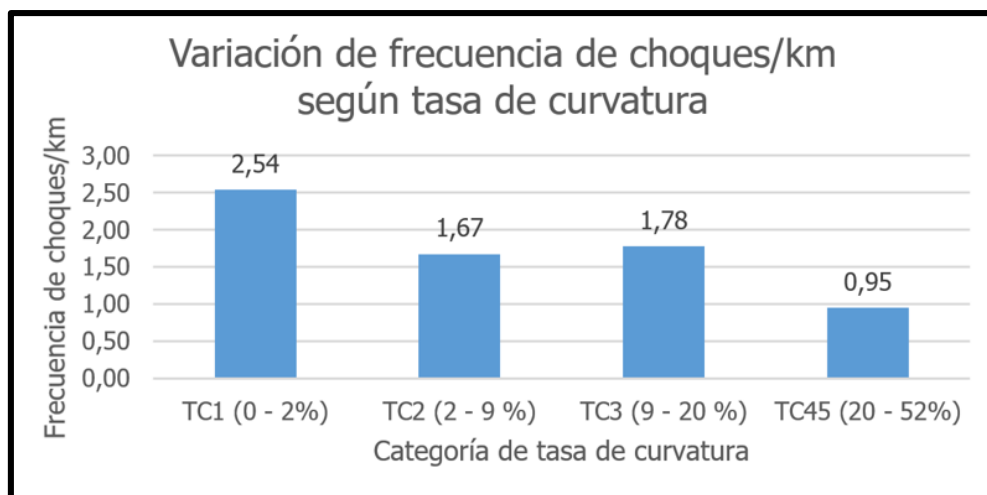


Figura 4-10. Variación de la frecuencia de choques esperado por km con respecto a la tasa de curvatura, basado en modelo bayesiano completo con choques totales del tramo 3

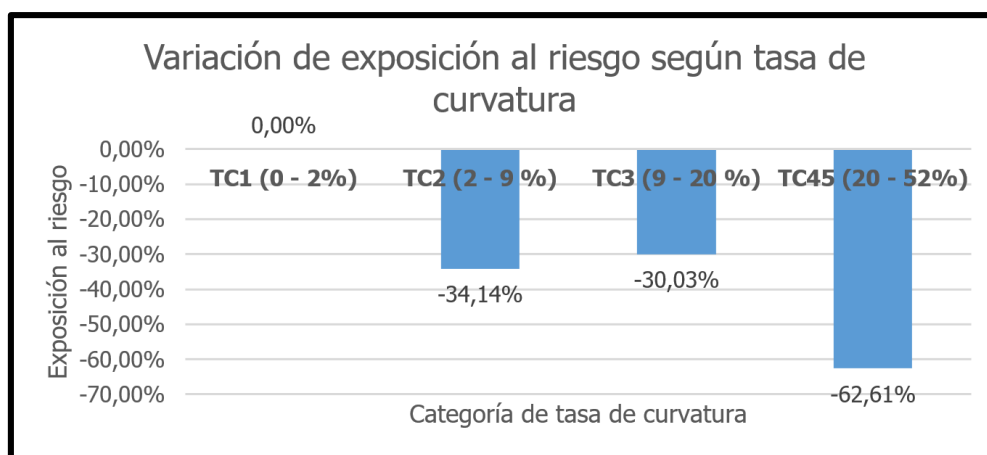


Figura 4-11. Variación de exposición al riesgo con respecto a la tasa de curvatura, basado en modelo bayesiano completo con choques totales del tramo 3

La variable intercambio (Int.) resulta directamente proporcional a la ocurrencia de choques, consecuente con las deficiencias geométricas y de señalización cercanas a los accesos e intersecciones. Esta al presentar el valor de 1, asociado a la presencia de un intercambio, generó una frecuencia de choques/km de 3,13 y un 86,94% más de riesgo con respecto al caso base sin intercambio, con 1,67 choques/km.

Al igual que en el modelo binomial negativo, se mantiene la variable FWDprom significativa e inversa a la ocurrencia de choques, comportamiento evidente en la Figura 4-12. Puede interpretarse que, al reducir la velocidad ante condiciones deficientes en la estructural de pavimento, indirectamente genera condiciones de mayor seguridad y al efecto en el confort de conducir en una vía con altas deflexiones.

Para el caso en el que se evaluó el FWDprom mínimo de $5,81 \text{ mm} \times 10^{-2}$, la frecuencia de choques/km fue de 2,27, lo que representa con respecto al promedio de 1,67 choques/km un aumento en el riesgo de 35,93%. Caso opuesto se evidenció al evaluar el FWDprom máximo de $145,05 \text{ mm} \times 10^{-2}$, que generó 0,92 choques/km, lo que implica con respecto al promedio una reducción en la frecuencia de choques/km de 45,01%.

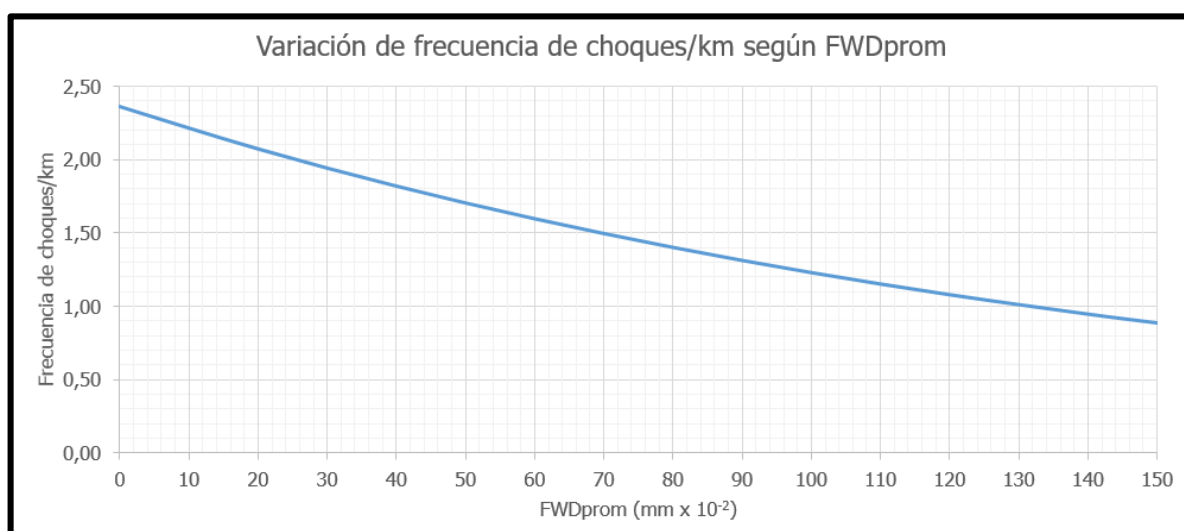


Figura 4-12. Variación de la frecuencia de choques esperado por km con respecto a la FWDprom, basado en modelo bayesiano completo con choques totales del tramo 3

Las variables ZLD3 y ZLD4 presentan una tendencia directamente proporcional con respecto a la ocurrencia de los choques, sin embargo, nuevamente se asume que esconde la velocidad de operación en estas variables. Cabe destacar que el tramo 3 presenta un 60 % de sus datos con zonas libres amplias, acompañadas de pendientes bajas, por lo que propicia los efectos colaterales de la velocidad de operación en el modelo. De forma análoga a la ZLD, Agüero (2013) utilizó el ancho del espaldón en 5 categorías, las cuales presentaron coeficientes positivos en todos los casos, pero con una mayor magnitud en el caso del

espaldón mínimo, condición que responde a la afirmación de Elvik (2009), en la que un espaldón mayor reduce la exposición al riesgo.

El efecto colateral de la velocidad de operación presente en la zona libre disponible (ZLD) se visualiza en la Figura 4-13, donde se evidencia que a mayor ZLD, mayor frecuencia de choques esperados/km.

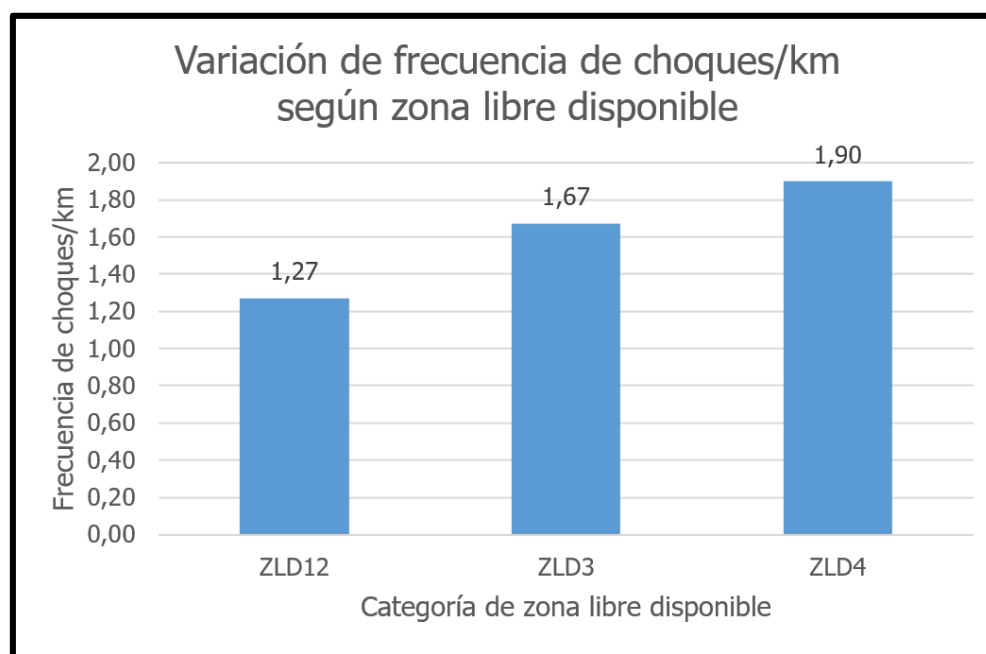


Figura 4-13. Variación de la frecuencia de choques esperado por km con respecto a la zona libre disponible, basado en modelo bayesiano completo con choques totales del tramo 3

Nota: Interpretar ZLD12 como espacio insuficiente para que un automóvil salga de la vía completamente, ZLD3 como el espacio suficiente para que un automóvil salga completamente de la vía y ZLD4 como un área amplia en la cual se excede el espacio necesario para que un automóvil salga completamente de la vía.

Al utilizar la ZLD12 como base, el aumento en el riesgo para la categoría ZLD3 es de 31,56% y para la ZLD4 de 49,44%. Sin embargo, a pesar de que el comportamiento es opuesto a lo que típicamente se pensaría en materia de seguridad vial, se interpretó este efecto como un aumento en la velocidad de operación al presentarse márgenes amplias, típicas de la zona, acompañadas de pendientes verticales bajas.

Tabla 4-22. Modelo de exceso de frecuencia de choques esperados con ajuste de Bayes completo con choques totales para el tramo 3

Variable	Estimación	Desv. Est.	Intervalo de confianza 95 %			
			2,5%	5,0%	95,0%	97,5%
Intercepto	-8,3070	1,0980	-10,42	-10,1	-6,465	-6,139
Int.	0,6256	0,2493	0,1354	0,2188	1,036	1,119
TPD	0,9752	0,1172	0,7427	0,7791	1,167	1,201
FWDprom	-0,0065	0,0023	-0,011	-0,010	-0,0027	-0,0020
TC2	-0,4177	0,1366	-0,6862	-0,6425	-0,1928	-0,1486
TC3	-0,3571	0,1912	-0,7327	-0,6724	-0,0433	0,0170
TC45	-0,9837	0,3253	-1,629	-1,521	-0,4506	-0,35
A1	0,0197	0,2413	-0,4529	-0,3749	0,4162	0,4919
A2	0,3302	0,1432	0,0517	0,0960	0,5687	0,6142
A3	-0,0927	0,2526	-0,5913	-0,5089	0,3223	0,4007
A4	-0,3281	0,3828	-1,086	-0,9613	0,2973	0,4176
ZLD3	0,2743	0,1487	-0,0158	0,0307	0,52	0,5673
ZLD4	0,4017	0,1855	0,0430	0,0992	0,7076	0,7683
Desviación Estándar	0,7085	0,0435	0,6264	0,6392	0,7819	0,7966
Varianza	0,5109	0,0758	0,3788	0,3968	0,6435	0,6753

$$\bar{D} = 2314 ; D(\hat{\theta}) = 2142 ; DIC = 2487 ; p_D = 172,3$$

4.7.6 Modelo del tramo 3 con choques equivalentes

En la Tabla 4-23 se presentan las variables significativas para el tramo 3 con choques equivalentes, de los cuales se desprenden tendencias similares al modelo de choques totales y se obtuvo la Ecuación 4-6:

$$N = e^{\beta_{intercepto}} * L * TPD^{\beta_{TPD}} * e^{\beta_{TC2} * TC2} * e^{\beta_{TC3} * TC3} * e^{\beta_{TC45} * TC45} \\ * e^{\beta_{ZLD3} * ZLD3} * e^{\beta_{ZLD4} * ZLD4}$$

Ecuación 4-6

donde:

N: Número de choques esperados

L: Longitud del segmento, evaluada como 1 km

β_i : Coeficiente asociado a cada variable del modelo

Análogo al comportamiento presente en el modelo con choques totales, la Figura 4-14 presenta la diferencia en la exposición al riesgo según el TPD. Al comparar los valores de frecuencia de choques/km del TPD mínimo registrado de 2319 vehículos/día y el TPD máximo de 24575 vehículos/día, se obtiene una diferencia de 1871,60%.

La diferencia entre los coeficientes de los modelos con choques totales y equivalentes es de 0,2878, esto al registrar 0,9752 el modelo con choques totales y 1,263 el de choques equivalentes, sin embargo, la diferencia en la exposición al riesgo entre el TPD mínimo y máximo se duplica al considerar el efecto de la severidad de los choques.

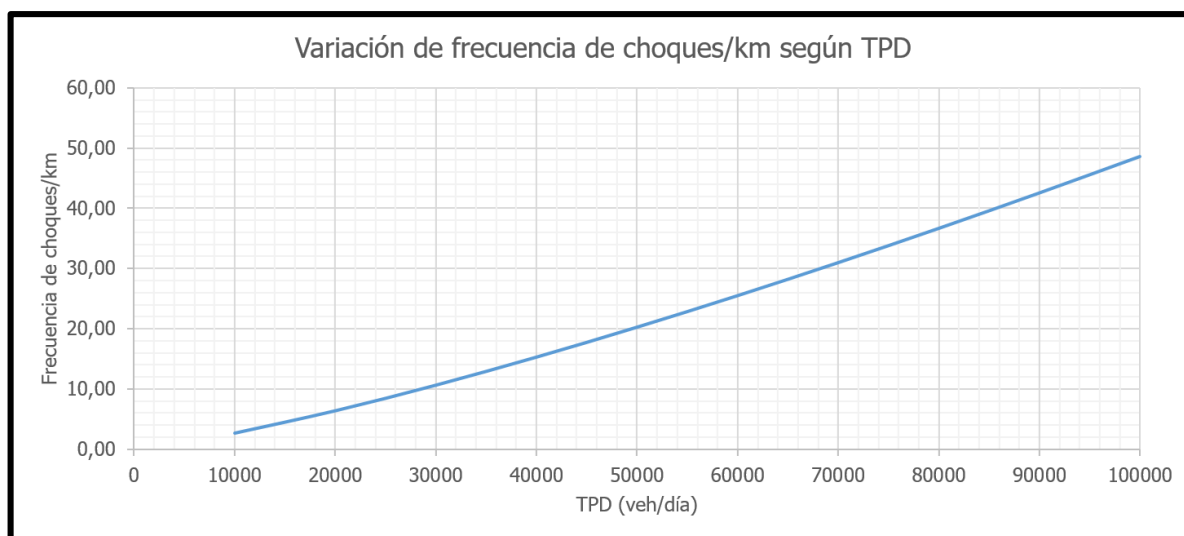


Figura 4-14. Variación de la frecuencia de choques esperado por km con respecto al TPD, basado en modelo bayesiano completo con choques equivalentes del tramo 3

En la Figura 4-15 y Figura 4-16 se presenta la frecuencia de choques/km con una tendencia generalizada hacia la reducción al aumentar la tasa de curvatura, lo que se interpretó como un efecto colateral de la velocidad de operación, así como del confort de conducir en tramos curvos.

Al detallar el porcentaje de variación a la exposición del riesgo, utilizando como base la condición TC1 con una tasa de curvatura entre 0 % y 2%, la mayor reducción se presenta para la categoría T45, correspondiente a una tasa de curvatura entre 20% y 52%, con una reducción del riesgo de 68,08%.

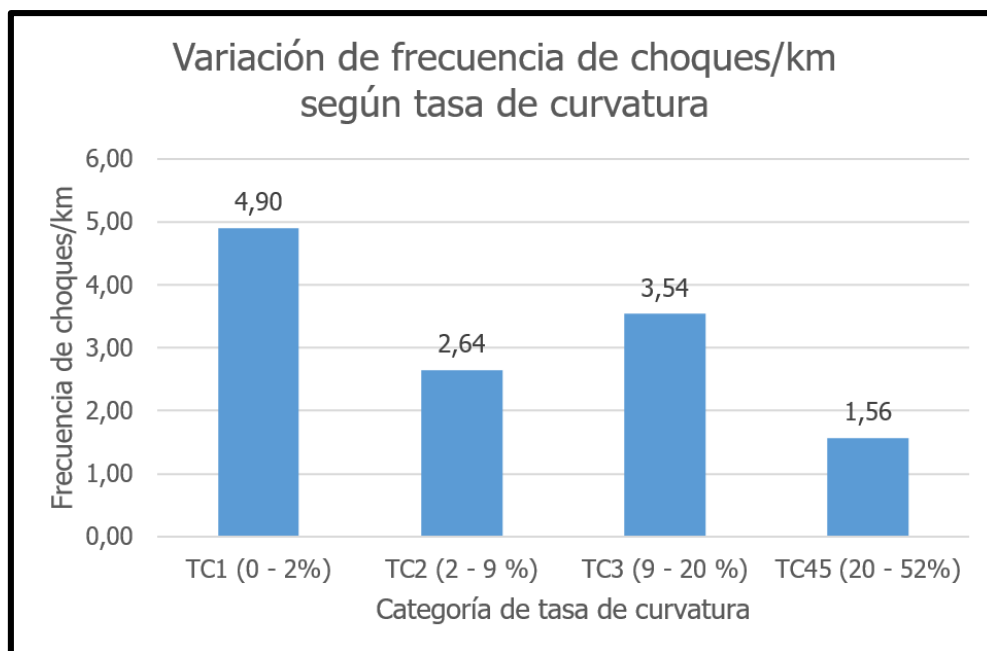


Figura 4-15. Variación de la frecuencia de choques esperado por km con respecto a la tasa de curvatura, basado en modelo bayesiano completo con choques equivalentes del tramo 3

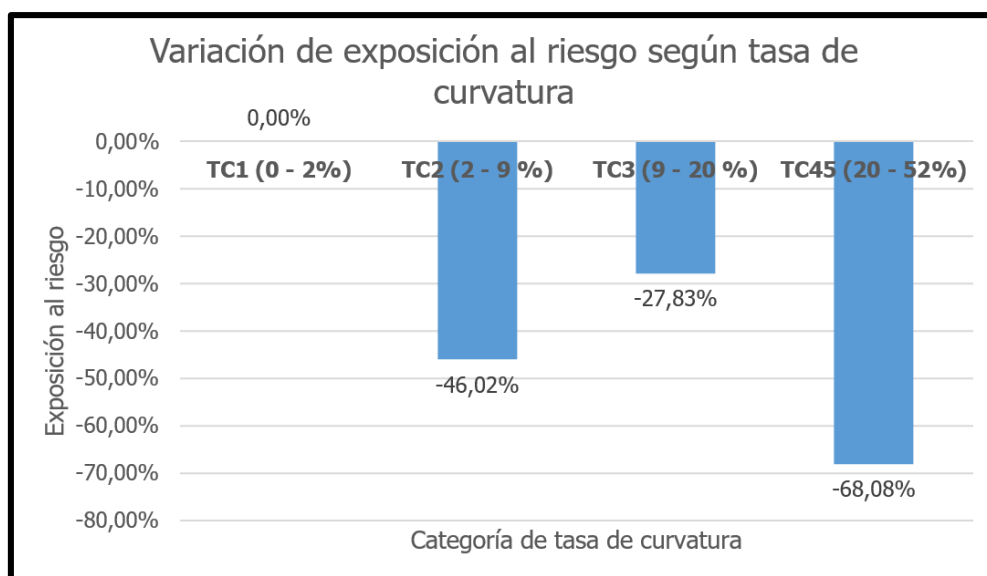


Figura 4-16. Variación de exposición al riesgo con respecto a la tasa de curvatura, basado en modelo bayesiano completo con choques equivalentes del tramo 3

Otra variable que se asumió fue influenciada por la velocidad de operación fue la zona libre disponible (ZLD), en la Figura 4-17 se evidencia que a mayor ZLD, mayor frecuencia de choques esperados/km.

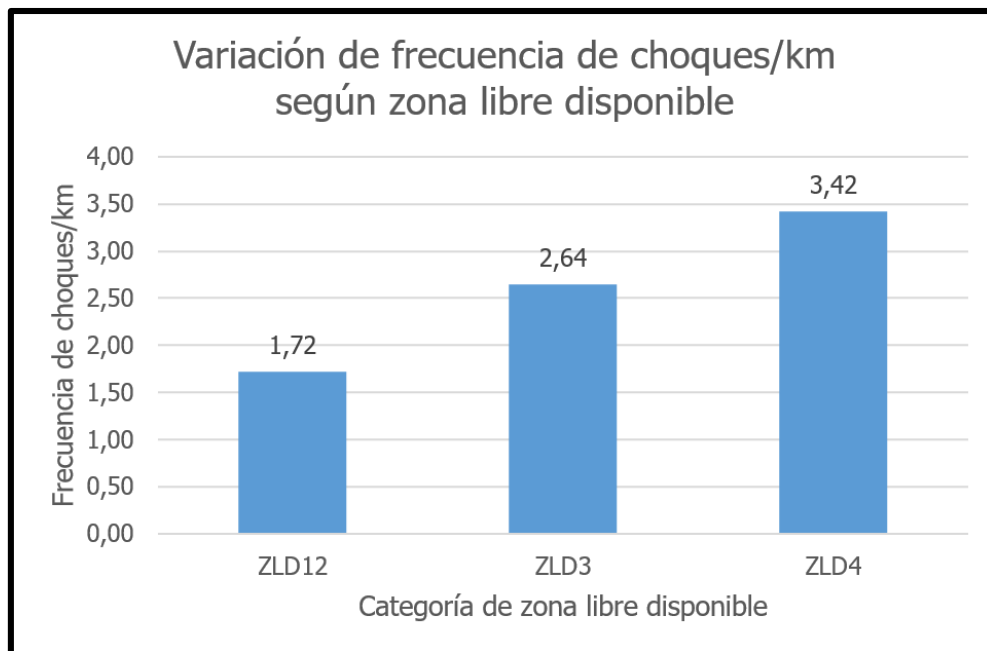


Figura 4-17. Variación de la frecuencia de choques esperado por km con respecto a la zona libre disponible, basado en modelo bayesiano completo con choques equivalentes del tramo 3

Nota: Interpretar ZLD12 como espacio insuficiente para que un automóvil salga de la vía completamente, ZLD3 como el espacio suficiente para que un automóvil salga completamente de la vía y ZLD4 como un área amplia en la cual se excede el espacio necesario para que un automóvil salga completamente de la vía.

Al utilizar la ZLD12 como base, el aumento en el riesgo para la categoría ZLD3 es de 53,62% y para la ZLD4 de 98,54%. Se repite el mismo comportamiento observado en el modelo con choques totales, pero se duplica el riesgo registrado para el caso con ZLD4.

Tabla 4-23. Modelo de exceso de frecuencia de choques esperados con ajuste de Bayes completo con choques equivalentes para el tramo 3

Variable	Estimación	Desv. Est.	Intervalo de confianza 95 %			
			2,5%	5,0%	95,0%	97,5%
Intercepto	-10,47	1,203	-12,9	-12,47	-8,52	-8,138
TPD	1,263	0,1312	1,009	1,049	1,481	1,527
TC2	-0,6166	0,2002	-1,014	-0,9522	-0,2891	-0,2278
TC3	-0,3261	0,2837	-0,8858	-0,7927	0,1438	0,2302
TC45	-1,142	0,4689	-2,068	-1,913	-0,3741	-0,2176
ZLD3	0,4293	0,212	0,0198	0,08152	0,7806	0,8475
ZLD4	0,6858	0,239	0,2206	0,2944	1,081	1,157
Desviación Estándar	1,287	0,05128	1,191	1,205	1,374	1,393
Varianza	1,664	0,1932	1,323	1,371	2,003	2,079

$$\bar{D} = 5254 ; D(\bar{\theta}) = 5019 ; DIC = 5489 ; p_D = 235,1$$

4.7.7 Comparación de modelos con choques totales y equivalentes

Basado en los resultados de las regresiones Poisson Log Normal, se generaron los modelos de exceso de frecuencia de choques esperado con ajuste de Bayes completo, segmentado por tramo y tipo de choque considerado. En la Tabla 4-24 se presenta la cantidad de segmentos con excesos de frecuencia positivos para cada tramo y tipo de choque utilizado.

Tabla 4-24. Comparación de segmentos críticos con exceso de frecuencia de choques esperado con ajuste de Bayes completo por tramo

Tramo	Tramos homogéneos	Segmentos críticos	
		Choques totales	Choques equivalentes
1	20	6	10
2	75	35	39
3	283	141	144
Total	378	182	193

Al analizar los resultados de la Tabla 4-24 se evidencia el efecto de considerar de forma indirecta la severidad del choque, con un aumento de 11 sitios o un 6,0 % de los sitios evidenciados con choques equivalentes con respecto al total de choques totales.

Al contrastar los segmentos críticos con choques totales y equivalentes, sin tomar en consideración la priorización, 149 sitios coinciden en ambos casos, equivalente a 77,2% de coincidencias, tomando como referencia los 193 segmentos críticos identificados con el modelo de choques equivalentes.

Como resultado del método de exceso de frecuencia de choques esperado con ajuste de Bayes completo, se obtienen los excesos de frecuencia de choques esperado por segmento, así como la desviación estándar y los valores de la distribución de probabilidad posterior, con los cuales se verifica que el segmento sea representativo según el intervalo de confianza del 95%.

En la Tabla 4-25 y Tabla 4-26 se presenta la jerarquización de los segmentos, ordenados según el mayor exceso de frecuencia para el tramo 1 y segmentado según el uso de choques totales y equivalentes.

Para seleccionar los segmentos críticos, el AASHTO (2010) recomienda intervenir del 5% al 10% de los segmentos estudiados, por lo que, de aplicar este criterio, solo se analizarían los primeros 2 segmentos. Sin embargo, se presenta el 100% de los segmentos del tramo 1, con el fin de detallar el procedimiento de análisis.

Inicialmente se ordenaron los segmentos en orden descendente basados en la variable exceso de frecuencia, lo que permitió identificar los segmentos más críticos o con mayor potencial de mejora.

Basado en los valores de la distribución posterior, se identifica con el signo positivo o negativo si la información asociada al segmento se encuentra en el intervalo de confianza al 95%.

Al contar con los valores de la distribución posterior, el análisis es intuitivo, por lo que al observar los valores del segmento 6 en la Tabla 4-25, se identifica que la información se encuentra en un intervalo de confianza superior al 95%, ya que los valores de los percentiles 2,5%, 5,0%, 95,0% y 97,5% presentan el mismo signo.

En el caso del segmento 19 en la Tabla 4-25, la confiabilidad se encuentra en un intervalo menor al 95%, ya que los valores de la distribución son negativos en el percentil 2,5% y 5,0%, pero positivos del 95% y 97,5%. Al revisar el resto de la distribución, el cambio de signo se presenta en el percentil 10%, por lo que se podría afirmar que el intervalo de confianza es del 90% para el segmento.

Este análisis evidencia la diferencia más importante entre el análisis bayesiano empírico y el completo, ya que el análisis bayesiano completo permite identificar la confianza de mis

supuestos para cada una de las variables, incluidos los excesos de frecuencia. Esto permite no solo jerarquizar según el mayor exceso de frecuencia, pero también permite discernir la confianza de los resultados y tomar decisiones con mayor información.

Tabla 4-25. Jerarquización de segmentos según exceso de frecuencia del tramo 1, obtenidos con el método de exceso de frecuencia de choques esperado con ajuste de Bayes completo con choques totales

Segmento	Exceso de frecuencia	Desv. Est.	Intervalo de confianza 95 %			
			2,50%	5,00%	95,00%	97,50%
6	55,26	12,98	25,90	32,21	74,31	77,50
7	36,77	6,82	22,22	25,03	47,32	49,17
11	36,55	9,91	14,95	19,37	51,54	54,04
5	35,39	12,01	8,11	13,86	52,90	55,71
10	26,46	5,20	15,83	17,74	34,76	36,29
19	23,08	16,26	-14,33	-6,18	46,35	50,00
14	-0,21	12,26	-27,43	-21,99	17,88	20,78
8	-1,13	14,33	-33,10	-26,60	19,58	22,85
17	-2,22	4,07	-11,18	-9,29	3,83	4,83
2	-2,72	7,67	-20,29	-16,56	8,31	10,05
18	-2,87	5,86	-15,91	-13,18	5,63	7,01
20	-5,27	5,08	-16,68	-14,23	2,07	3,26
13	-6,16	8,79	-25,72	-21,73	6,80	8,94
16	-6,25	8,91	-26,47	-22,15	6,46	8,40
15	-7,91	7,76	-25,18	-21,62	3,53	5,37
4	-9,35	9,96	-32,63	-27,44	4,74	6,89
9	-10,14	23,08	-61,96	-51,12	22,89	28,08
1	-10,94	4,11	-20,68	-18,49	-5,26	-4,45
3	-13,06	5,31	-25,65	-22,77	-5,69	-4,63
12	-20,74	14,33	-53,09	-46,38	0,13	3,32

Al contrastar la Tabla 4-25 y Tabla 4-26, es evidente que el orden de los segmentos es distinto, tanto en jerarquización como en la codificación de los segmentos.

Es importante destacar que el modelo con choques equivalentes es el que mejor extrae el comportamiento de las variables, esto al incluir en el modelo la severidad de los choques. Por lo que no es suficiente utilizar el modelo de exceso de frecuencia de choques con ajuste de Bayes completo, sino que es recomendable utilizar choques equivalentes en vez de choques totales.

Tabla 4-26. Jerarquización de segmentos según exceso de frecuencia del tramo 1, obtenidos con el método de exceso de frecuencia de choques esperado con ajuste de Bayes completo con choques equivalentes

Segmento	Exceso de frecuencia	Desv. Est.	Intervalo de confianza 95 %			
			2,50%	5,00%	95,00%	97,50%
7	70,79	9,24	51,22	55,10	84,84	87,38
6	54,50	17,05	16,54	24,74	78,63	82,57
5	44,77	15,99	8,93	16,83	67,46	71,01
15	34,66	13,87	4,35	10,76	55,56	59,18
19	31,94	26,80	-28,38	-14,92	69,38	75,33
18	29,95	7,08	15,35	18,00	41,24	43,33
16	14,26	9,19	-5,64	-1,64	28,28	30,72
10	14,12	12,62	-14,41	-8,16	31,75	34,49
20	3,37	5,30	-8,02	-5,75	11,58	13,06
17	1,28	4,13	-7,51	-5,75	7,70	8,89
11	-3,95	28,04	-67,98	-53,90	34,15	39,82
2	-8,76	10,25	-31,92	-26,66	5,55	7,77
1	-13,84	5,64	-26,66	-23,78	-6,10	-4,95
4	-15,55	13,40	-45,76	-39,14	3,03	5,89
3	-18,62	7,21	-35,09	-31,32	-8,75	-7,31
13	-32,93	18,61	-75,07	-65,53	-6,86	-2,81
14	-34,82	25,94	-93,84	-80,26	1,57	7,24
12	-42,37	31,09	-113,40	-96,80	1,15	8,12
8	-78,14	43,91	-179,00	-156,80	-19,32	-10,70
9	-130,20	71,80	-295,70	-258,70	-34,07	-20,38

En la Tabla 4-27 y Tabla 4-28 se presentan los segmentos críticos del tramo 2, separados en choques totales y equivalentes. El tramo 2 contó con 75 segmentos, por lo que el criterio del 10% identificaría los primeros 8 segmentos, sin embargo, se incorporaron 9 en ambos casos.

La incorporación del 9.º segmento radica en el intervalo de confianza del segmento 32 de la Tabla 4-28, ya que este presenta en el percentil 2,5% y 5,0% valores negativos y en los percentiles 95,0% y 97,5% valores positivos, lo que evidencia un intervalo de confianza menor al 95%.

Al contrastar el orden y numeración de los segmentos presentes en la Tabla 4-27 y Tabla 4-28, se evidencia que el segmento 22 es consistente en ambos análisis, ya que se ubica en la primera posición, sin embargo, el segmento 59 presente como 2.º más crítico en la Tabla

4-28, es el 5.º en prioridad según el análisis con choques totales. Al verificar el segmento 27, 3.º en prioridad según la Tabla 4-28, no se encuentra en la lista de segmentos de la Tabla 4-27, condición peor a la diferencia de jerarquización, ya que del todo no se intervendría el segmento al basar el modelo solo en choques totales.

Tabla 4-27. Jerarquización de segmentos según exceso de frecuencia del tramo 2, obtenidos con el método de exceso de frecuencia de choques esperado con ajuste de Bayes completo con choques totales

Segmento	Exceso de frecuencia	Desv. Est.	Intervalo de confianza 95 %			
			2,50%	5,00%	95,00%	97,50%
22	20,61	3,02	14,93	15,77	25,70	26,77
32	11,44	5,90	-1,26	1,20	20,43	21,98
37	8,66	3,91	0,73	2,10	14,94	16,11
60	8,09	2,12	4,20	4,76	11,72	12,51
59	6,18	2,28	1,91	2,56	10,06	10,87
43	5,72	1,68	2,75	3,15	8,67	9,31
38	4,98	1,95	1,44	1,96	8,33	9,05
86	4,35	1,78	1,13	1,60	7,42	8,09
44	3,46	1,26	1,30	1,59	5,71	6,23

Tabla 4-28. Jerarquización de segmentos según exceso de frecuencia del tramo 2, obtenidos con el método de exceso de frecuencia de choques esperado con ajuste de Bayes completo con choques equivalentes

Segmento	Exceso de frecuencia	Desv. Est.	Intervalo de confianza 95 %			
			2,50%	5,00%	95,00%	97,50%
22	29,30	3,56	22,56	23,61	35,32	36,57
59	27,96	3,74	20,94	21,99	34,31	35,57
27	18,45	7,50	2,29	5,44	29,89	31,81
60	17,57	3,13	11,73	12,61	22,89	24,00
32	14,50	16,63	-22,78	-15,40	38,80	42,44
49	13,93	3,17	8,03	8,92	19,31	20,44
78	13,70	2,55	9,06	9,73	18,05	19,01
86	12,98	2,71	7,98	8,73	17,59	18,63
79	12,43	2,51	7,84	8,51	16,76	17,69

De forma análoga se presenta el 10% de los segmentos del tramo 3, presente en la Tabla 4-29 y Tabla 4-30. Para este caso, cabe destacar que, al ser el tramo con mayor cantidad de segmentos, generó el modelo con mayor confianza y de inferencias más robustas.

Tabla 4-29. Jerarquización de segmentos según exceso de frecuencia del tramo 3, obtenidos con el método de exceso de frecuencia de choques esperado con ajuste de Bayes completo con choques totales

Segmento	Exceso de frecuencia	Desv. Est.	Intervalo de confianza 95 %			
			2,50%	5,00%	95,00%	97,50%
295	8,72	1,85	5,44	5,89	11,95	12,64
209	7,59	1,76	4,45	4,89	10,67	11,33
297	7,21	1,89	3,75	4,25	10,45	11,16
172	5,94	1,59	3,10	3,49	8,72	9,34
179	4,91	1,79	1,70	2,15	8,02	8,67
182	3,99	1,52	1,32	1,67	6,65	7,26
177	3,70	1,65	0,78	1,19	6,55	7,23
193	3,39	1,23	1,28	1,56	5,59	6,10
186	3,17	1,31	0,89	1,20	5,46	5,97
247	3,15	1,17	1,16	1,42	5,22	5,72
192	3,02	1,26	0,84	1,13	5,24	5,74
217	2,88	1,25	0,70	1,00	5,08	5,60
203	2,78	1,32	0,48	0,80	5,11	5,66
184	2,63	1,59	-0,27	0,16	5,38	5,99
245	2,62	1,06	0,86	1,08	4,53	4,98
204	2,58	1,18	0,54	0,82	4,69	5,18
270	2,47	1,16	0,47	0,73	4,52	5,02
296	2,46	1,16	0,47	0,73	4,53	5,02
228	2,33	0,93	0,81	1,00	4,02	4,42
212	2,32	1,25	0,14	0,43	4,53	5,03
121	2,24	1,14	0,23	0,52	4,25	4,70
279	2,15	1,18	0,12	0,39	4,25	4,73
206	1,90	1,33	-0,55	-0,17	4,17	4,69
213	1,83	0,96	0,24	0,45	3,56	3,97
185	1,83	1,21	-0,26	0,02	3,97	4,45
202	1,78	1,15	-0,18	0,07	3,82	4,31
227	1,77	1,03	0,01	0,24	3,59	4,02
268	1,76	1,14	-0,21	0,05	3,78	4,25

Al comparar los resultados de la Tabla 4-29 y Tabla 4-30, sobresale que el segmento 134, sección más crítica con el método con choques equivalentes, no aparece en la jerarquización de la Tabla 4-29, donde se utilizaron choques totales. Esta discrepancia evidencia la gran diferencia en los resultados al incorporar la severidad de los choques o al únicamente utilizar la cantidad total de eventos.

Tabla 4-30. Jerarquización de segmentos según exceso de frecuencia del tramo 3, obtenidos con el método de exceso de frecuencia de choques esperado con ajuste de Bayes completo con choques equivalentes

Segmento	Exceso de frecuencia	Desv. Est.	Intervalo de confianza 95 %			
			2,50%	5,00%	95,00%	97,50%
134	28,83	4,12	20,90	22,15	35,68	37,07
172	28,24	3,22	22,21	23,13	33,70	34,78
290	27,26	3,30	21,06	22,02	32,85	34,02
295	25,25	3,28	19,15	20,06	30,84	31,98
209	24,31	3,15	18,44	19,34	29,68	30,78
240	22,20	2,97	16,70	17,51	27,29	28,37
247	21,77	3,05	16,11	16,96	26,96	28,07
213	19,67	2,74	14,62	15,37	24,35	25,32
193	17,77	2,69	12,80	13,54	22,34	23,31
302	17,44	2,59	12,70	13,38	21,90	22,83
127	17,25	2,59	12,55	13,21	21,69	22,67
263	16,31	3,48	9,65	10,71	22,14	23,34
235	15,93	2,84	10,67	11,45	20,79	21,76
204	15,44	2,51	10,79	11,48	19,73	20,67
307	15,32	2,56	10,62	11,28	19,72	20,67
237	15,11	3,00	9,54	10,37	20,24	21,28
296	13,52	2,73	8,46	9,19	18,17	19,15
280	13,39	2,33	9,09	9,71	17,38	18,23
220	13,14	2,46	8,61	9,27	17,37	18,25
318	12,89	2,37	8,58	9,21	16,97	17,85
312	12,18	2,32	7,96	8,56	16,18	17,03
179	11,71	2,78	6,51	7,28	16,42	17,43
258	11,55	2,55	6,85	7,54	15,93	16,86
276	11,39	2,37	6,93	7,62	15,39	16,26
167	10,67	1,90	7,25	7,73	13,95	14,67
269	10,56	2,36	6,20	6,86	14,58	15,43
297	10,38	2,52	5,71	6,41	14,68	15,57
184	10,06	2,50	5,36	6,07	14,29	15,17

4.8 Comparación de métodos

Se compararon los resultados de cada método, tomando como resultado confiable o de referencia los generados mediante el exceso de frecuencia de choques equivalentes con ajuste de Bayes completo.

La comparación se basó en los resultados del método de exceso de frecuencia de choques equivalentes con ajuste de Bayes completo contra los diversos métodos, segmentando los resultados según el uso de choques totales y equivalentes.

Para cada tramo y tipo de choque se realizaron dos tipos de comparaciones a nivel de coincidencias:

- **Priorización:** corresponde a la cantidad de segmentos que coinciden según la priorización exacta de los segmentos, generada a partir de los resultados del método de exceso de frecuencia de choques equivalentes con ajuste de Bayes completo.
- **Segmento:** corresponde a la cantidad de segmentos que, indiferentemente de la priorización, coinciden con los presentes en los resultados del método de exceso de frecuencia de choques equivalentes con ajuste de Bayes completo.

Para el caso del tramo 1, se analizó el total de 20 segmentos, esto con el fin de evidenciar las diferencias globales de todos los métodos. En el caso del resto de métodos, únicamente se analizó el 10 % de los segmentos más críticos, basado en la recomendación del Highway Safety Manual (AASHTO, 2010).

4.8.1 Comparación Tramo 1

En la Tabla 4-31 se presenta la comparación de métodos basados en el uso de choques totales. En esta se presenta cada segmento del tramo 1 ordenado de mayor prioridad a menor prioridad, lo que permite analizar la variación entre los distintos métodos, así como compararlos contra los resultados del método Bayes completo con choques equivalentes (BCE), utilizado como referencia.

De la Tabla 4-31 se evidencia a nivel general que ningún método coincide completamente con la priorización obtenida por el método BCE. A nivel coincidencia de priorización y de segmentos, si se selecciona únicamente el 10 % de los tramos, el método tasa de choques y el método tasa crítica de choques presentan un 100 % de aciertos, asociado a ubicar los

segmentos 7 y 6 en un orden idéntico a la jerarquización del BCE. Sin embargo, al analizar el 50 % de los tramos, el método tasa de choques y el método tasa crítica de choques mantiene solo 2 segmentos jerarquizados correctamente, para un 20 % de aciertos.

Al analizar la identificación de segmentos, sin valorar la jerarquización, resalta que todos los métodos identificaron al menos 5 segmentos de los 10 más críticos, por lo que ningún método con choques totales logra aproximar los resultados obtenidos mediante el BCE.

Tabla 4-31. Comparación de métodos para caso con choques totales en el tramo 1

Priorización	Segmentos por método					
	Bayes C. equiv.	Frec. choques	Tasa de choques	Tasa crit. choques	Bayes emp.	Bayes C. totales
1	<u>7</u>	<u>7</u>	<u>7</u>	<u>7</u>	5	<u>6</u>
2	<u>6</u>	10	<u>6</u>	<u>6</u>	11	<u>7</u>
3	5	11	10	10	<u>7</u>	11
4	15	16	5	5	13	5
5	19	3	11	11	19	10
6	18	14	19	19	4	19
7	16	15	2	2	16	14
8	10	8	4	8	10	8
9	20	12	8	4	14	17
10	17	13	9	9	18	2
11	11	4	14	14	12	18
12	2	9	13	13	17	20
13	1	19	12	12	20	13
14	4	2	15	15	2	16
15	3	18	18	16	3	15
16	13	17	17	18	15	4
17	14	1	16	17	1	9
18	12	20	20	20	<u>6</u>	1
19	8	5	3	3	8	3
20	9	<u>6</u>	1	1	9	12
Coincidencia priorización (10%)		1	2	2	0	0
Coincidencia priorización (50%)		1	2	2	3	0
Coincidencia segmentos (10%)		1	2	2	0	2
Coincidencia segmentos (50%)		5	5	6	5	6

Nota: coincidencia de priorización corresponde a la cantidad de segmentos que presenta la misma jerarquización que los obtenidos por el método de BCE y coincidencia de segmentos corresponde a la cantidad de segmentos que se repiten con respecto a los segmentos críticos identificados con BCE.

Al comparar los métodos que utilizaron choques equivalentes como insumo en la Tabla 4-32, se repite el comportamiento de los parámetros de coincidencia de priorización y de segmentos para el 10 % o 50 % del total de segmentos, donde ningún método logra replicar o asemejarse a los resultados del BCE.

Tabla 4-32. Comparación de métodos para caso con choques equivalentes en el tramo 1

Priorización	Segmentos por método					
	Bayes C. equiv.	Frec. choques	Tasa de choques	Tasa crit. choques	EPDO	Bayes emp.
1	<u>7</u>	9	<u>7</u>	<u>7</u>	15	<u>7</u>
2	<u>6</u>	<u>6</u>	10	10	18	18
3	5	11	<u>6</u>	<u>6</u>	12	15
4	15	5	5	5	1	5
5	19	<u>7</u>	11	11	9	11
6	18	19	19	19	<u>7</u>	4
7	16	12	15	9	8	12
8	10	8	8	8	16	16
9	20	14	9	15	20	13
10	17	15	2	12	13	10
11	11	10	14	14	14	3
12	2	13	12	2	10	17
13	1	18	4	4	11	14
14	4	16	18	18	19	2
15	3	4	13	13	5	20
16	13	2	16	16	3	19
17	14	20	20	20	4	1
18	12	17	17	17	2	<u>6</u>
19	8	3	1	1	<u>6</u>	9
20	9	1	3	3	17	8
Coincidencia priorización (10%)		1	1	1	0	1
Coincidencia priorización (50%)		1	1	1	1	1
Coincidencia segmentos (10%)		1	1	1	0	1
Coincidencia segmentos (50%)		5	5	5	4	6

Nota: coincidencia de priorización corresponde a la cantidad de segmentos que presenta la misma jerarquización que los obtenidos por el método de BCE y coincidencia de segmentos corresponde a la cantidad de segmentos que se repiten con respecto a los segmentos críticos identificados con BCE.

El tramo 1 presenta la menor cantidad de segmentos de los tramos analizados, por lo que su variabilidad y cantidad de datos puede influir en los resultados, por lo que no se considera suficiente para realizar alguna afirmación acerca de la idoneidad de los diversos métodos.

4.8.2 Comparación Tramo 2

Al analizar los segmentos resultantes de la priorización con el uso de choques totales en la Tabla 4-33, resaltan que la mayoría de métodos coinciden en al menos 5 segmentos. Sin embargo, a nivel de coincidencia en la priorización, el valor más alto fue de 3 segmentos de 9 para el método de Bayes completo con choques totales.

Tabla 4-33. Comparación de métodos para caso con choques totales en el tramo 2

Priorización	Segmentos por método					
	Bayes C. equiv.	Frec. choques	Tasa de choques	Tasa crit. choques	Bayes emp.	Bayes C. totales
1	<u>22</u>	32	<u>22</u>	<u>22</u>	<u>22</u>	<u>22</u>
2	<u>59</u>	<u>22</u>	60	60	32	32
3	27	37	44	21	37	37
4	60	21	87	<u>59</u>	43	60
5	32	27	21	43	<u>59</u>	<u>59</u>
6	49	<u>59</u>	<u>59</u>	44	27	43
7	78	60	43	86	60	38
8	86	30	46	87	86	86
9	79	31	86	23	29	44
Coincidencia priorización (10%)		0	1	1	2	3
Coincidencia priorización (15%)		0	1	1	2	3
Coincidencia segmentos (10%)		5	3	3	6	5
Coincidencia segmentos (15%)		5	3	3	6	5

Nota: coincidencia de priorización corresponde a la cantidad de segmentos que presenta la misma jerarquización que los obtenidos por el método de BCE y coincidencia de segmentos corresponde a la cantidad de segmentos que se repiten con respecto a los segmentos críticos identificados con BCE.

Si se verifica en la Tabla 4-33 la ubicación de los segmentos 22 y 59, correspondientes a los segmentos prioritarios a intervenir según el método BCE, solo el método de frecuencia de choques no logra ubicar al segmento 22 como prioridad 1, sin embargo, a nivel general ningún método logra priorizar de forma satisfactoria el resto de segmentos para el 10% más crítico.

Al comparar los métodos que utilizaron choques equivalentes como insumo en la Tabla 4-34, destaca el método tasa de choques que presentó un total de 7 coincidencias de 9 segmentos, correspondiente a un 78% de coincidencias, sin embargo, la jerarquización solo se cumple en 2 segmentos, asociado a un 22 % de coincidencias con el método BCE.

Esto implica que ninguno de los métodos permite jerarquizar de forma apropiada los segmentos críticos, condición que resalta al observar los segmentos 22 y 59 en la Tabla 4-34 en todos los métodos, correspondientes a la prioridad 1 y 2 según el método BCE. Se evidencia que algunos métodos ubican el segmento 22 como prioridad 1, mientras otros lo ubican como prioridad 6, condición que se repite para el segmento 59.

Tabla 4-34. Comparación de métodos para caso con choques equivalentes en el tramo 2

Priorización	Segmentos por método					
	Bayes C. equiv.	Frec. choques	Tasa de choques	Tasa crit. choques	EPDO	Bayes emp.
1	<u>22</u>	32	<u>22</u>	<u>22</u>	78	<u>59</u>
2	<u>59</u>	37	78	78	79	62
3	27	27	79	<u>59</u>	41	34
4	60	<u>22</u>	60	60	94	31
5	32	<u>59</u>	<u>59</u>	79	75	29
6	49	30	27	27	84	<u>22</u>
7	78	31	75	75	65	79
8	86	38	44	44	82	32
9	79	29	86	34	93	37
Coincidencia priorización (10%)		1	2	2	0	0
Coincidencia priorización (15%)		1	2	2	0	0
Coincidencia segmentos (10%)		4	7	5	2	4
Coincidencia segmentos (15%)		4	7	5	2	4

Nota: coincidencia de priorización corresponde a la cantidad de segmentos que presenta la misma jerarquización que los obtenidos por el método de BCE y coincidencia de segmentos corresponde a la cantidad de segmentos que se repiten con respecto a los segmentos críticos identificados con BCE.

4.8.3 Comparación Tramo 3

El tramo 3 presentó la mayor cantidad de segmentos de los 3 tramos, por lo que permitió contar con modelos más robustos, con una mayor variabilidad y cantidad de datos, por lo que las inferencias entre métodos que se obtienen del tramo, son las estadísticamente más contundentes.

En la Tabla 4-35 se presenta la comparación para los métodos con choques totales. A nivel general, nuevamente se evidencia que la priorización y códigos de segmento no son iguales o similares entre los métodos, a pesar de que el método Bayes completo presente 11 coincidencias en los segmentos, pero no coinciden en ninguna ocasión al valorar la priorización. Al verificar la ubicación del segmento 134, segmento más crítico evidenciado

con el método BCE, el método frecuencia de choques lo ubica en prioridad 27 y el método Bayes empírico lo ubica en prioridad 19, mientras el resto de métodos lo excluyen de la priorización.

Tabla 4-35. Comparación de métodos para caso con choques totales en el tramo 3

Priorización	Segmentos por método					
	Bayes C. equiv.	Frec. choques	Tasa de choques	Tasa crit. choques	Bayes emp.	Bayes C. totales
1	<u>134</u>	295	228	228	209	295
2	<u>172</u>	209	<u>172</u>	<u>172</u>	295	209
3	290	297	374	209	182	297
4	295	<u>172</u>	209	295	<u>172</u>	<u>172</u>
5	209	179	295	297	179	179
6	240	177	297	374	186	182
7	247	182	206	206	177	177
8	213	184	249	182	176	193
9	193	180	166	193	193	186
10	302	164	193	249	185	247
11	127	186	182	179	279	192
12	263	203	171	166	268	217
13	235	192	357	164	247	203
14	204	193	179	212	217	184
15	307	230	165	177	161	245
16	237	178	164	180	194	204
17	296	212	212	186	266	270
18	280	217	245	203	212	296
19	220	160	180	245	<u>134</u>	228
20	318	185	204	171	258	212
21	312	204	168	165	200	121
22	179	206	186	204	288	279
23	258	247	203	192	121	206
24	276	270	177	247	181	213
25	167	279	247	213	192	185
26	269	121	205	296	222	202
27	297	<u>134</u>	192	357	227	227
28	184	161	213	185	180	268
Coincidencia priorización(10%)		0	1	3	1	0
Coincidencia segmentos (10%)		9	9	10	8	11

Nota: coincidencia de priorización corresponde a la cantidad de segmentos que presenta la misma jerarquización que los obtenidos por el método de BCE y coincidencia de segmentos corresponde a la cantidad de segmentos que se repiten con respecto a los segmentos críticos identificados con BCE.

Esto implica que los diversos métodos fallan en identificar los segmentos más críticos del tramo 3, sumado a la incapacidad de priorizar correctamente.

En la Tabla 4-36 se presentan los segmentos priorizados según los métodos con choques equivalentes y en términos generales, aumenta la cantidad de segmentos coincidentes, ya que estos presentan la misma naturaleza que el método BCE trata de explicar, basada en choques equivalentes.

Cabe destacar que el método frecuencia de choques coincide en 26 segmentos de 28, correspondiente a un 93 % de coincidencia de segmentos, sin embargo, solo presenta 7 coincidencias en la priorización. Adicionalmente, los métodos de tasa de choques y tasa crítica de choques presentan 21 y 19 coincidencias en los códigos de segmento, pero se acompañan de valores bajos de coincidencia en la priorización.

Al buscar los segmentos 134 y 172, correspondientes a los dos segmentos más críticos obtenidos con el método BCE, a pesar de que en su mayoría se presentan entre el resto de métodos, a nivel de priorización no son satisfactorios.

El método frecuencia de choques presenta el segmento 134 en prioridad 1, seguido del método Bayes empírico que lo ubica en la 5ta posición, el EPDO lo ubica en la posición 19, el método de tasa crítica de choques en la prioridad 24 y el método de tasa de choques lo ubica en la prioridad 27.

En el caso del segmento 172, los métodos frecuencia de choques, tasa de choques y tasa crítica de choques lo ubican en prioridad 2, coincidente con el método BCE, el método Bayes empírico lo ubica en la prioridad 19, mientras el método EPDO no lo incluye en la priorización de los 28 segmentos.

Tabla 4-36. Comparación de métodos para caso con choques equivalentes en el tramo 3

Priorización	Segmentos por método					
	Bayes C. equiv.	Frec. choques	Tasa de choques	Tasa crit. choques	EPDO	Bayes emp.
1	<u>134</u>	<u>134</u>	240	240	307	209
2	<u>172</u>	<u>172</u>	<u>172</u>	<u>172</u>	312	193
3	290	290	290	290	127	280
4	295	295	302	302	290	258
5	209	209	372	372	313	<u>134</u>
6	240	263	166	307	343	318
7	247	240	307	166	363	237
8	213	247	209	209	370	290
9	193	213	213	213	240	235
10	302	193	295	295	235	167
11	127	237	318	318	318	240
12	263	235	377	193	302	244
13	235	296	312	312	269	202
14	204	302	193	127	103	181
15	307	204	127	247	237	166
16	237	127	247	377	275	177
17	296	179	165	165	306	179
18	280	307	170	170	372	185
19	220	220	167	167	<u>134</u>	<u>172</u>
20	318	280	370	204	286	207
21	312	258	280	280	263	132
22	179	184	204	296	236	200
23	258	269	296	220	377	186
24	276	276	220	<u>134</u>	280	164
25	167	297	269	235	97	176
26	269	230	235	269	241	302
27	297	318	<u>134</u>	258	213	286
28	184	177	258	286	170	103
Coincidencia priorización(10%)		7	2	3	0	0
Coincidencia segmentos (10%)		26	21	19	14	14

Nota: coincidencia de priorización corresponde a la cantidad de segmentos que presenta la misma jerarquización que los obtenidos por el método de BCE y coincidencia de segmentos corresponde a la cantidad de segmentos que se repiten con respecto a los segmentos críticos identificados con BCE.

El caso particular evidenciado en el tramo 3 con los métodos frecuencia de choques, tasa de choques y tasa crítica de choques con datos de choques equivalentes, donde la identificación de segmentos fue alta, se interpretó como efecto de la homogeneidad en el

tramo, la cantidad de segmentos que lo conforman y la cantidad de años de choques viales incorporados a los modelos.

Adicionalmente, la aplicación de estos métodos con choques equivalentes surgió como propuesta del presente trabajo de investigación, por lo que no se ha identificado este comportamiento en otras investigaciones.

Por ende, es contundente la necesidad de utilizar métodos estadísticos que utilicen la mayor cantidad de variables que permitan caracterizar el fenómeno de la ocurrencia de los choques viales, que dispongan de todas las capacidades de procesamiento que los computadores actuales cuenten y generen resultados confiables mediante ecuaciones específicas para cada tramo de estudio, no mediante ecuaciones genéricas, así como validables a través de metodologías estadísticas.

Las condiciones descritas se cumplen al utilizar el método de exceso de frecuencias de choques esperados mediante el ajuste de Bayes completo con choques equivalentes, y al contar con las capacidades tecnológicas vigentes a la fecha, no se justifica utilizar métodos simples como los recomendados por el PIARC (2003) o utilizar tan solo el ajuste de Bayes empírico como lo recomienda el HSM del AASHTO (2010).

Capítulo 5 . Diagnóstico y soluciones propuestas

Posterior a la aplicación del método de exceso de frecuencia de choques con ajuste de Bayes completo con choques equivalentes, se inspeccionó el 10% de los segmentos más críticos de cada tramo durante febrero y abril del 2019.

Se procedió a desglosar por cada tramo y segmento los hallazgos que generan deficiencias en materia de seguridad vial, así como la identificación de propuestas de intervención.

5.1 Tramo 1: Autopista General Cañas

En el tramo 1 el 10% de los segmentos correspondió a 2 sitios, sin embargo, se incorporó un tercer segmento, ya que en conjunto forman 3 segmentos continuos con exceso de frecuencia de choques, en la Figura 5-1 se presentan los segmentos críticos seleccionados.

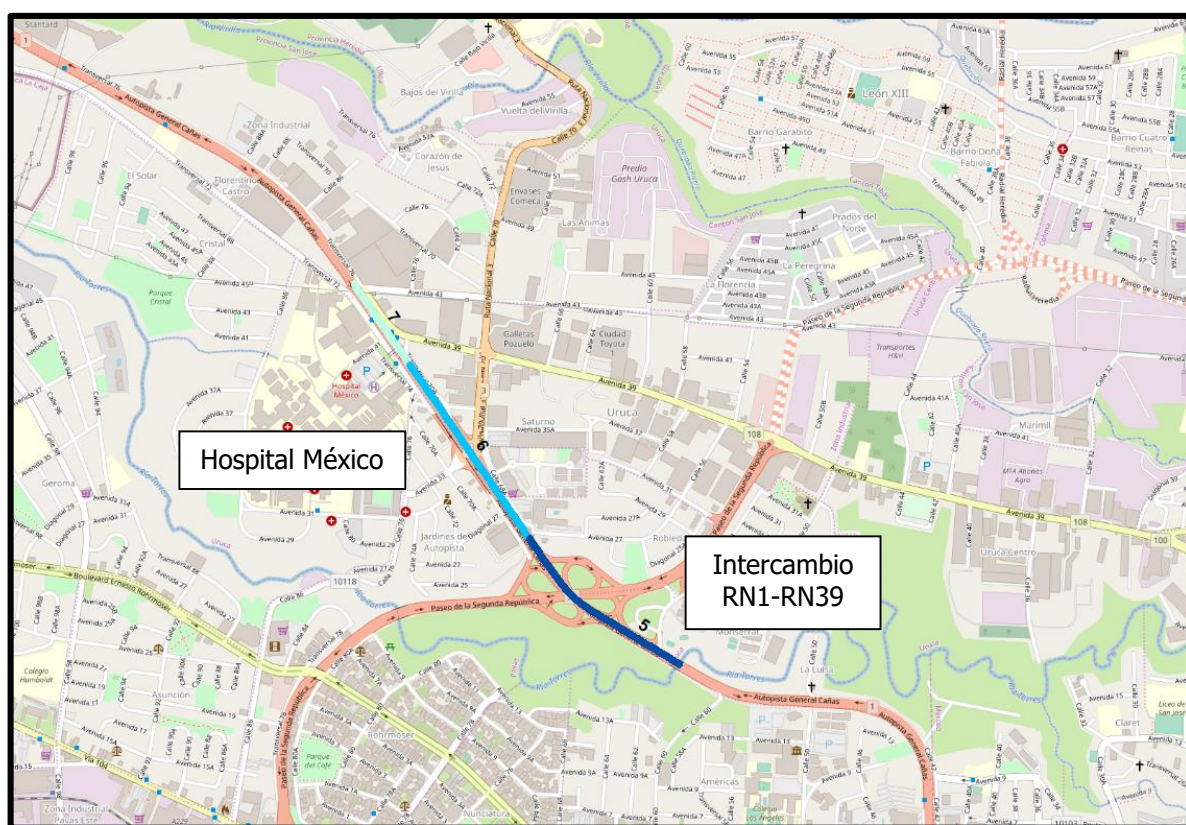


Figura 5-1. Segmentos críticos Tramo 1

5.1.1 Segmento 5

El segmento 5 inicia en el kilómetro 1,5 aledaño al Intercambio con Ruta Nacional 39 y se extiende por 0,63 km hasta el acceso del Hotel Best Western Irazú en el kilómetro 2,13.

El tramo presenta una velocidad reglamentaria de 60 km/h, espaldón reducido de ancho menor al de un automóvil y 2 carriles por sentido de aproximadamente 3,49 m de ancho.

El registro de choques viales del 2012 al 2014 presentó 221 incidentes, segmentados en 2 heridos graves, 24 leves y 195 con solo daños materiales. Estos eventos categorizados según el usuario más crítico en el evento se segmentan en 25 con motocicleta, 118 con vehículo liviano, 11 en autobús, 11 vehículos pesados y 56 en la categoría de otros.

De los tipos de choques viales registrados sobresalen 2 por atropello de peatones, 1 caída de algún ocupante, 1 colisión con objeto fijo, 1 objeto sobre vehículo, 6 salidas de la vía y 3 vuelcos; de los cuales, las posiciones de colisión más recurrentes fueron 118 por detrás, 55 de costado, 22 en ángulo recto y 19 laterales en mismo sentido de circulación.

Los hallazgos encontrados fueron:

- Entrecruzamiento de flujos.
- Ausencia de carriles de aceleración y desaceleración en los accesos con el intercambio con Ruta Nacional 39.
- Rebote de colas ante reducción de sección transversal y accesos del intercambio con Ruta Nacional 39.
- Cunetas con pendientes riesgosas.
- Ausencia de espaldón interno y externo.
- Parada de autobús sin bahía.
- Sistema de contención vehicular en mediana deficiente y en mal estado.
- Cruce de peatones por la calzada

Ante los distintos hallazgos, se propone:

- Ampliar el derecho de vía para incorporar carriles de aceleración y desaceleración.
- Cunetas con pendiente segura o cubiertas por rejilla.
- Sección transversal continua.
- Mediana con sistema de contención vehicular diseñado.

- Ampliar espaldones.
- Reubicar parada de autobús en segmento 6 y dotarle de una bahía.
- Analizar la movilidad peatonal entre márgenes de la vía y dotar de un cruce peatonal seguro que conecte los atractores y generadores de viajes.

5.1.2 Segmento 6

El segmento 6 inicia en el kilómetro 2,13 aledaño al acceso del Hotel Best Western Irazú y se extiende por 0,67 km hasta el Hospital México en el kilómetro 2,80.

El tramo presenta una velocidad reglamentaria de 60 km/h, ausencia de espaldón y 3 carriles por sentido de aproximadamente 3,59 m de ancho.

El registro de choques viales del 2012 al 2014 presentó 288 incidentes, segmentados en 21 heridos leves y 267 con solo daños materiales. Estos eventos categorizados según el usuario más crítico en el evento se segmentan en 18 con motocicleta, 138 con vehículo liviano, 9 en autobús, 9 vehículos pesados y 108 en la categoría de otros.

De los tipos de choques viales registrados sobresalen 5 por atropello de peatones, 1 caída de algún ocupante, 6 colisión con objeto fijo y 5 vuelcos; de los cuales, las posiciones de colisión más recurrentes fueron 127 por detrás, 79 de costado, 27 en ángulo recto y 14 laterales en mismo sentido de circulación.

Los hallazgos encontrados fueron:

- Ausencia de demarcación horizontal en rotonda.
- Geometría de rotonda confusa (sobre ancho en algunos accesos).
- Accesos inseguros aledaños a rotonda.
- Aproximaciones a paso a desnivel colisionados.
- Ausencia de espaldón interno y externo.
- Cunetas con pendientes riesgosas.

Ante los distintos hallazgos, se propone:

- Demarcar y señalizar rotonda y aproximaciones.
- Analizar funcionalidad de accesos aledaños a rotonda.
- Dotar de amortiguadores de impacto las aproximaciones de paso a desnivel.

- Cunetas con pendiente segura o cubiertas por rejilla.

5.1.3 Segmento 7

El segmento 7 inicia en el kilómetro 2,80 aledaño al Hospital México y se extiende por 0,31 km hasta acceso aledaño a Repretel en el kilómetro 3,11.

El tramo presenta una velocidad reglamentaria de 60 km/h, ausencia de espaldón y 3 carriles por sentido de aproximadamente 3,41 m de ancho.

El registro de choques viales del 2012 al 2014 presentó 168 incidentes, segmentados en 2 fallecidos, 22 heridos leves y 144 con solo daños materiales. Estos eventos categorizados según el usuario más crítico en el evento se segmentan en 12 con motocicleta, 72 con vehículo liviano, 18 en autobús, 4 vehículos pesados y 62 en la categoría de otros.

De los tipos de choques viales registrados sobresalen 11 por atropello de peatones, 2 caída de algún ocupante, 3 colisión con objeto fijo, 1 con objeto sobre vehículo, 1 con salida de vía y 2 vuelcos; de los cuales, las posiciones de colisión más recurrentes fueron 74 por detrás, 45 de costado, 17 en ángulo recto y 10 laterales en mismo sentido de circulación.

Los hallazgos encontrados fueron:

- Baranda en mediana y márgenes colisionada.
- Ausencia de espaldón interno y externo.
- Cunetas con pendientes riesgosas.
- Parada de autobús sin bahía.
- Bahías de autobús sobre Ruta Nacional 1 sin carriles de aceleración y desaceleración.
- Demarcación horizontal deficiente.
- Rebote de cola en acceso aledaño a Repretel.
- Marginal invadida por taxistas.

Ante los distintos hallazgos, se propone:

- Demarcar vía.
- Cunetas con pendiente segura o cubiertas por rejilla.
- Analizar reubicación de paradas de autobús sobre marginal.

según el usuario más crítico en el evento se segmentan en 6 con motocicleta, 52 con vehículo liviano, 5 en autobús, 5 vehículos pesados y 14 en la categoría de otros.

De los tipos de choques viales registrados sobresalen 1 por atropello de animal, 2 colisión con objeto fijo, 1 con objeto sobre vehículo, 3 con salida de vía y 2 vuelcos; de los cuales, las posiciones de colisión más recurrentes fueron 32 por detrás 24 de costado y 9 laterales en mismo sentido de circulación.

Los hallazgos encontrados fueron:

- Ausencia de espaldón interno y externo.
- Cunetas con pendientes riesgosas.
- Mediana sin sistema de contención vehicular.
- Rebote de colas.

Ante los distintos hallazgos, se propone:

- Cunetas con pendiente segura o cubiertas por rejilla.
- Incorporar espaldones en ampliación de la vía.
- Ampliación de vía con transiciones seguras entre accesos.

5.2.2 Segmento 27

El segmento 27 inicia en el kilómetro 16,43 en el puente sobre el río Ciruelas y se extiende por 0,72 km hasta el kilómetro 17,15.

El tramo presenta una velocidad reglamentaria de 90 km/h, ausencia de espaldón y 2 carriles por sentido de aproximadamente 3,86 m de ancho.

El registro de choques viales del 2012 al 2014 presentó 41 incidentes, segmentados en 1 fallecido, 3 heridos graves, 14 heridos leves y 23 con solo daños materiales. Estos eventos categorizados según el usuario más crítico en el evento se segmentan en 9 con motocicleta, 8 con vehículo liviano, 2 en autobús, 3 vehículos pesados y 19 en la categoría de otros.

De los tipos de choques viales registrados sobresalen 6 por atropello de peatones, 2 colisión con objeto fijo, 1 con salida de vía y 2 vuelcos; de los cuales, las posiciones de colisión más recurrentes fueron 14 por detrás, 7 de costado y 6 de frente.

Los hallazgos encontrados fueron:

- Ausencia de espaldón externo.
- Ausencia de sistema de contención vehicular con divisoria entre sentido de los flujos.
- Cunetas con pendientes riesgosas.
- Parada de autobús debajo del puente.
- Ausencia de cruce peatonal.

Ante los distintos hallazgos, se propone:

- Cunetas con pendiente segura o cubiertas por rejilla.
- Incorporar espaldones en ampliación de la vía.
- Incorporar mediana con sistema de contención vehicular para dividir flujos vehiculares.
- Incorporar bahía de autobús o trasladarla a marginal.
- Incorporar pasarela peatonal en puente sobre el río Villa Bonita o zona segura de cruce aledaña a bahía de autobús.

5.2.3 Segmento 49

El segmento 49 inicia en el kilómetro 32,16 y se extiende por 0,84 km, pasando por la Fábrica Nacional de Licores hasta el kilómetro 33.

El tramo presenta una velocidad reglamentaria de 80 km/h, sin espaldón y 4 carriles en total de aproximadamente 3,43 m de ancho.

El registro de choques viales del 2012 al 2014 presentó 16 incidentes, segmentados en 1 fallecido, 1 herido grave, 1 herido leve y 13 con solo daños materiales. Estos eventos categorizados según el usuario más crítico en el evento se segmentan en 6 con vehículo liviano, 1 vehículo pesado y 9 en la categoría de otros.

De los tipos de choques viales registrados sobresalen 1 por atropello de peatones, 1 con salida de vía y 1 vuelco; de los cuales, las posiciones de colisión más recurrentes fueron 9 por detrás y 2 en ángulo recto.

Los hallazgos encontrados fueron:

- Ausencia de espaldón.
- Cunetas con pendientes riesgosas.
- Maniobras de giro inseguras hacia marginales.
- Parada de autobús sin bahía y con mala visibilidad.
- Ausencia de cruce peatonal seguro.

Ante los distintos hallazgos, se propone:

- Cunetas con pendiente segura o cubiertas por rejilla.
- Realizar estudio detallado de movimientos y giros.
- Ampliar sección para incorporar carriles de aceleración y desaceleración hacia marginales.
- Incorporar bahía de autobús en sección plana y con buena visibilidad.
- Conectar marginales mediante puente peatonal.

5.2.4 Segmento 59

El segmento 59 inicia en el kilómetro 36,8 y se extiende por 0,87 km hasta el kilómetro 37,67.

El tramo presenta una velocidad reglamentaria de 60 km/h, con zona libre suficiente para que un automóvil salga de la vía y 3 carriles en total de aproximadamente 3,5 m de ancho.

El registro de choques viales del 2012 al 2014 presentó 40 incidentes, segmentados en 1 fallecido, 1 herido grave, 10 heridos leves y 28 con solo daños materiales. Estos eventos categorizados según el usuario más crítico en el evento se segmentan en 3 con motocicleta, 20 con vehículo liviano, 1 en autobús, 1 vehículo pesado y 15 en la categoría de otros.

De los tipos de choques viales registrados sobresalen 3 por atropello de peatones, 1 caída de algún ocupante, 1 objeto sobre vehículo, 1 con salida de vía y 2 vuelcos; de los cuales, las posiciones de colisión más recurrentes fueron 15 por detrás, 8 de costado y 4 lateral en el mismo sentido de circulación.

Los hallazgos encontrados fueron:

- Cunetas con pendientes riesgosas.
- Maniobras de giro inseguras.

- Accesos no canalizados mediante marginal.
- Ausencia de cruce peatonal seguro.

Ante los distintos hallazgos, se propone:

- Cunetas con pendiente segura o cubiertas por rejilla.
- Realizar estudio detallado de movimientos y giros.
- Ampliar sección para incorporar carriles de aceleración y desaceleración hacia marginales.
- Implementar estudio de flujos y trayectorias peatonales.
- Colocar bandas alertadoras que aumenten la atención de los conductores.

5.2.5 Segmento 60

El segmento 60 inicia en el kilómetro 37,67 y se extiende por 0,58 km, pasando por el Peaje entre Grecia y Naranjo hasta el kilómetro 38,25.

El tramo presenta una velocidad reglamentaria de 60 km/h, con zona libre reducida insuficiente para que un vehículo salga completo de la vía y 2 carriles en total de aproximadamente 4,36 m de ancho.

El registro de choques viales del 2012 al 2014 presentó 40 incidentes, segmentados en 2 heridos graves, 7 heridos leves y 31 con solo daños materiales. Estos eventos categorizados según el usuario más crítico en el evento se segmentan en 2 con motocicleta, 11 con vehículo liviano, 3 en autobús, 2 vehículo pesado y 22 en la categoría de otros.

De los tipos de choques viales registrados sobresalen 3 por atropello de peatones, 1 colisión con objeto fijo y 2 vuelcos; de los cuales, las posiciones de colisión más recurrentes fueron 23 por detrás y 5 de frente.

Los hallazgos encontrados fueron:

- Maniobras de giro inseguras hacia y desde los accesos.
- Accesos no canalizados mediante marginal.
- Reducción de sección transversal de la vía por talud.
- Parada de autobús sobre vía.
- Aproximación de peaje deficiente.

Ante los distintos hallazgos, se propone:

- Ampliar sección para incorporar carriles de giro hacia y desde marginales.
- Ampliar sección para incorporar carriles de aceleración y desaceleración hacia marginales.
- Reubicar paradas de autobús en marginales.
- Mejorar aproximación a peaje mediante amortiguadores de impacto.
- Rellenar talud para mantener sección transversal de 2 carriles por sentido constante.

5.2.6 Segmento 78

El segmento 78 inicia en el kilómetro 47,25 y se extiende por 0,34 km hasta el puente sobre el río Grande en el kilómetro 47,59.

El tramo presenta una velocidad reglamentaria de 80 km/h, con zona libre reducida insuficiente para que un vehículo salga completo de la vía y 2 carriles en total de aproximadamente 3,85 m de ancho.

El registro de choques viales del 2012 al 2014 presentó 2 incidentes, segmentados en 1 fallecido y 1 heridos graves. Estos eventos categorizados según el usuario más crítico en el evento se segmentan en 1 con motocicleta y 1 con vehículo liviano.

Ambos tipos de choques viales fueron vuelco, con un ángulo de choque tipo lateral en el mismo sentido de circulación y uno desconocido.

Los hallazgos encontrados fueron:

- Percepción de alta velocidad de operación.
- Aproximaciones del puente inseguras.
- Márgenes cubiertos de vegetación.

Ante los distintos hallazgos, se propone:

- Colocar bandas alertadoras que aumenten la atención de los conductores.
- Limpieza de márgenes.
- Ampliación de espaldón.

- Mejorar aproximación al puente sobre el río Grande con sistemas de contención vehicular.

5.2.7 Segmento 79

El segmento 79 inicia en el kilómetro 47,595 y se extiende por 0,41 km hasta el paso a desnivel de la antigua carretera hacia Palmares en el kilómetro 48.

El tramo presenta una velocidad reglamentaria de 80 km/h, con zona libre reducida insuficiente para que un vehículo salga completo de la vía y 2 carriles en total de aproximadamente 4,55 m de ancho.

El registro de choques viales del 2012 al 2014 presentó 5 incidentes, segmentados en 1 fallecido, 3 heridos leves y 1 con solo daños materiales. Estos eventos categorizados según el usuario más crítico en el evento se segmentan en 1 con motocicleta, 1 con vehículo liviano y 3 en la categoría de otros.

De los tipos de choques viales registrados sobresalen 1 por atropello de peatones y 2 salidas de la vía; de los cuales, los ángulos de choques fueron uno de costado, de frente y lateral en el mismo sentido de circulación.

Los hallazgos encontrados fueron:

- Cunetas con pendientes riesgosas.
- Ausencia de espaldón en curva.
- Parada de autobús sobre vía.

Ante los distintos hallazgos, se propone:

- Cunetas con pendiente segura o cubiertas por rejilla.
- Limpieza de márgenes.
- Ampliación de espaldón.
- Ampliación de derecho de vía para ubicar bahía de autobús.

5.2.8 Segmento 86

El segmento 86 inicia en el kilómetro 50,35 y se extiende por 0,65 km frente a Palmares, pasando por el intercambio con la Ruta Nacional 135 hasta el kilómetro 51.

El tramo presenta una velocidad reglamentaria de 60 km/h, sin espaldón y 3 carriles en total de aproximadamente 3,83 m de ancho.

El registro de choques viales del 2012 al 2014 presentó 27 incidentes, segmentados en 1 herido grave, 9 heridos leves y 17 con solo daños materiales. Estos eventos categorizados según el usuario más crítico en el evento se segmentan en 2 con bicicleta, 2 con motocicleta, 9 con vehículo liviano, 1 con vehículo pesado y 13 en la categoría de otros.

De los tipos de choques viales registrados sobresalen 3 por atropello de peatones, 1 por atropello animal, 2 por caída de algún ocupante, 2 por colisión con bicicleta, 1 por colisión con objeto fijo y 3 salidas de la vía; de los cuales, los ángulos de choques predominantes fueron 8 de costado y 5 por detrás.

Los hallazgos encontrados fueron:

- Ausencia de espaldón.
- Parada de autobús sobre vía.
- Postes y árboles aledaños a la vía
- Paso a desnivel con pretil de puente hechizo y aproximaciones deficientes.
- Sistemas de contención vehicular con zona libre insuficiente para desarrollar su ancho de trabajo.
- Sistemas de contención vehicular semirrígidos anclados en concreto.
- Ausencia de carriles de aceleración y desaceleración en intercambio con Ruta Nacional 135.
- Aproximaciones a intercambio con la Ruta Nacional 135 propician altas velocidades de operación.

Ante los distintos hallazgos, se propone:

- Ampliación de espaldón.
- Ampliación de derecho de vía para ubicar bahía de autobús o reubicarlas en marginales.
- Mejorar aproximación a paso a desnivel con sistema de contención vehicular diseñados.
- Ampliar derecho de vía para ubicar carriles de aceleración y desaceleración.

- Implementar estudio de flujos y trayectorias peatonales.
- Colocar bandas alertadoras que aumenten la atención de los conductores.
- Colocar bandas rugosas en espaldón para alertar ante salida de vía.

5.3 Tramo 3: Carretera Interamericana Norte

En el tramo 3 el 10% de los segmentos correspondió a 28 sitios, en la Figura 5-3 y Figura 5-4 se presentan los segmentos críticos seleccionados.



Figura 5-3. Segmentos críticos Tramo 3-1

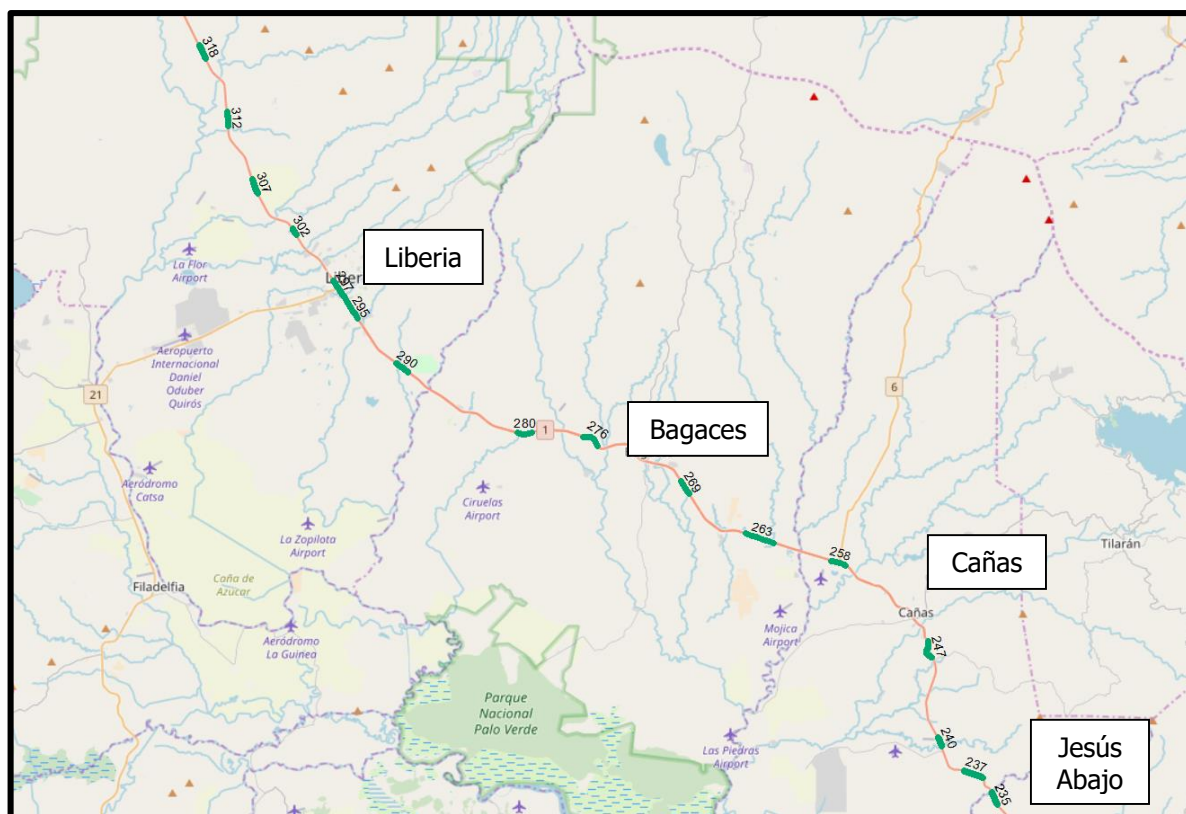


Figura 5-4. Segmentos críticos Tramo 3-2

Cabe destacar que los segmentos 258, 263, 269, 276, 280, 290, 295, 296 y 297 fueron intervenidos con la ampliación del tramo Cañas – Liberia, motivo por el cual los riesgos identificados en la base de datos, no necesariamente se presentan actualmente (2019), por lo que se evaluó a nivel general en materia de seguridad vial cada segmento.

En los segmentos intervenidos con la reconstrucción del tramo entre Cañas – Liberia, se identificaron hallazgos específicos de cada segmento en su respectiva sección, sin embargo, de forma generaliza se identificaron deficiencias en los sistemas de contención vehicular.

En la Figura 5-5 se evidencia que el sistema de contención semirrígido cuenta con sus elementos verticales anclados en el concreto, condición que aumenta la rigidez del sistema y no permite que funcione correctamente, este hallazgo se identificó en el tramo entre Cañas – Liberia. Según Valverde (2011) la cimentación del sistema de contención vehicular y el suelo deben cumplir con las condiciones bajo las que se realizaron los ensayos a escala real y recomendaciones del fabricante. De forma complementaria AASHTO (2011) indica que el anclaje correcto para los postes es en un material granular, que permita el desplazamiento

del poste ante una colisión y aumente la disipación de la energía del choque, condiciones que no se cumplen en la Figura 5-5.



Figura 5-5. Sistema de contención semirrígido anclado en concreto

A nivel de medianas con sistemas de contención rígido se repite la ausencia de una correcta incorporación de las luminarias en la mediana, condición que se repite en toda la vía e incluye la ampliación del segmento Cañas – Liberia, condición presente en la Figura 5-6.



Figura 5-6. Sistema de contención rígido en mediana con interrupción en su sección por luminaria

Incorporar la luminaria en la mediana genera una interrupción del sistema de contención, por lo que representa un riesgo adicional no diseñado para mitigar la severidad de un choque vial.

Para solventar la problemática expuesta, deben incorporarse sistemas que aumenten la sección transversal de la barrera e incorporen el poste dentro del sistema, no como una obstrucción del mismo. En la Figura 5-7 se presenta un elemento diseñado para incorporar la luminaria en la mediana, donde el aumento en la sección transversal evita que un vehículo colisione el poste y se mantengan las condiciones funcionales del sistema de contención vehicular.

Cabe destacar que el elemento presente en la Figura 5-7 es una alternativa, no la única solución. Idealmente la mediana podría ampliarse hasta una extensión de zona libre que no requiera un sistema de contención vehicular o que al menos permita colocar la luminaria en la mediana con suficiente espaciamiento lateral para que los sistemas de contención desarrollen su ancho de trabajo y deflexiones máximas.

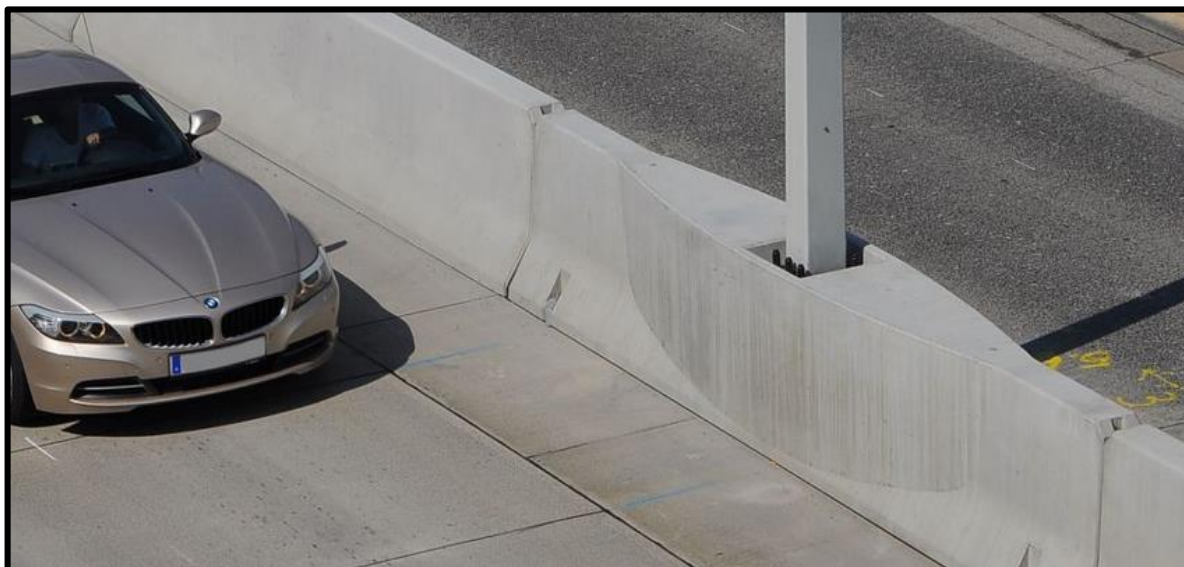


Figura 5-7. Sección de sistema de contención rígido para mediana con diseño apropiado para incorporar luminaria

Nota: Tomado de Special Applications, Delta Bloc Safety Barriers, recuperado de: <https://www.deltabloc.com/de/node/41>.

5.3.1 Segmento 127

El segmento 127 inicia en el kilómetro 67,645 y se extiende por 0,36 km hasta el kilómetro 68, atravesando el sector de Cambronero.

El tramo presenta una velocidad reglamentaria de 60 km/h, con zona libre suficiente para que un vehículo salga completo de la vía y 2 carriles en total de aproximadamente 4,22 m de ancho.

El registro de choques viales del 2012 al 2014 presentó 3 incidentes, segmentados en 1 fallecido, 1 heridos graves y 1 con solo daños materiales. Estos eventos categorizados según el usuario más crítico en el evento se segmentan en 2 con vehículo liviano y 1 en la categoría de otros.

Los eventos fueron colisiones entre vehículos con ángulo de choque frontal.

Los hallazgos encontrados fueron:

- Sección curva en pendiente.
- Visibilidad reducida por talud y vegetación en márgenes.

Ante los distintos hallazgos, se propone:

- Limpieza de vegetación en márgenes.
- Colocar delineadores en márgenes y para delimitar carriles en sentido opuesto, esto con el fin de canalizar e incentivar la reducción de la velocidad de operación.
- Colocar bandas alertadoras que aumenten la atención de los conductores.

5.3.2 Segmento 134

El segmento 134 inicia en el kilómetro 71 y se extiende por 1 km hasta el kilómetro 72, atravesando el sector de Cambronero, posterior a fábrica de alimentos Megatrópico.

El tramo presenta una velocidad reglamentaria de 60 km/h, con zona libre reducida insuficiente para que un vehículo salga completo de la vía y 2 carriles en total de aproximadamente 3,39 m de ancho.

El registro de choques viales del 2012 al 2014 presentó 14 incidentes, segmentados en 2 fallecidos, 5 heridos leves y 7 con solo daños materiales. Estos eventos categorizados según

el usuario más crítico en el evento se segmentan en 2 con motocicleta, 2 con vehículo liviano, 1 en autobús, 4 vehículo pesado y 5 en la categoría de otros.

De los tipos de choques viales registrados sobresalen 6 salidas de la vía y 1 vuelco; de los cuales, las posiciones de colisión más recurrentes fueron 5 por detrás y 4 de frente.

Los hallazgos encontrados fueron:

- Visibilidad reducida por talud.
- Sucesión de curvas horizontales con tramo en pendiente vertical.
- Sección sin espaldón ni sistema de contención vehicular.
- Cunetas con pendientes riesgosas.
- Grada entre carretera y margen.

Ante los distintos hallazgos, se propone:

- Colocar delineadores para delimitar carriles en sentido opuesto, esto con el fin de canalizar e incentivar la reducción de la velocidad de operación.
- Colocar bandas alertadoras que aumenten la atención de los conductores.
- Colocar bandas rugosas en espaldón para alertar ante salida de vía.
- Cunetas con pendiente segura o cubiertas por rejilla.

5.3.3 Segmento 167

El segmento 167 inicia en el kilómetro 88,64 y se extiende por 0,56 km hasta el kilómetro 89,2, posterior a Esparza.

El tramo presenta una velocidad reglamentaria de 60 km/h, con zona libre reducida insuficiente para que un vehículo salga completo de la vía y 2 carriles en total de aproximadamente 3,55 m de ancho.

El registro de choques viales del 2012 al 2014 presentó 9 incidentes, segmentados en 2 heridos graves, 3 heridos leves y 4 con solo daños materiales. Estos eventos categorizados según el usuario más crítico en el evento se segmentan en 1 con motocicleta, 6 con vehículo liviano, 1 vehículo pesado y 1 en la categoría de otros.

De los tipos de choques viales registrados sobresale 1 colisión con objeto fijo y 2 salidas de la vía; de los cuales, las posiciones de colisión más recurrentes fueron 4 de frente y 3 por detrás.

Los hallazgos encontrados fueron:

- Visibilidad reducida por vegetación en márgenes.
- Talud con pendiente negativa en la margen del sentido hacia Esparza.

Ante los distintos hallazgos, se propone:

- Limpieza de vegetación en márgenes.
- Colocar delineadores para delimitar carriles en sentido opuesto, esto con el fin de canalizar e incentivar la reducción de la velocidad de operación.
- Colocar bandas alertadoras que aumenten la atención de los conductores.
- Colocar bandas rugosas en espaldón para alertar ante salida de vía.

5.3.4 Segmento 172

El segmento 172 inicia en el kilómetro 90,67 y se extiende por 0,71 km hasta el kilómetro 91,38, pasando por el puente sobre el río Barranca.

El tramo presenta una velocidad reglamentaria de 60 km/h, ausencia de espaldón y 2 carriles en total de aproximadamente 3,32 m de ancho.

El registro de choques viales del 2012 al 2014 presentó 28 incidentes, segmentados en 1 fallecidos, 1 herido grave, 11 heridos leves y 15 con solo daños materiales. Estos eventos categorizados según el usuario más crítico en el evento se segmentan en 1 con bicicleta, 8 con motocicleta, 12 con vehículo liviano, 4 en autobús, 1 vehículo pesado y 2 en la categoría de otros.

De los tipos de choques viales registrados sobresalen 1 atropello animal, 1 colisión con bicicleta, 2 colisiones con objeto fijo, 1 objeto sobre vehículo y 1 salida de la vía; de los cuales, las posiciones de colisión más recurrentes fueron 15 por detrás y 6 de frente.

Los hallazgos encontrados fueron:

- Velocidad restringida de 40 km/h no responde a las condiciones geométricas que propician velocidades de operación registradas superiores a 80 km/h.
- Tramo rectilíneo en pendiente.
- Entrecruzamiento de flujos entre vía principal y accesos.
- Salida de vehículos pesados en el tajo del río Barranca.

Ante los distintos hallazgos, se propone:

- Colocar delineadores para delimitar carriles en sentido opuesto, esto con el fin de canalizar e incentivar la reducción de la velocidad de operación.
- Colocar bandas alertadoras que aumenten la atención de los conductores.
- Colocar bandas rugosas en espaldón para alertar ante salida de vía.
- Canalizar giros mediante carriles de giro izquierdo sobre vía principal.
- Incorporar carriles de aceleración y desaceleración en casos posibles.

5.3.5 Segmento 179

El segmento 179 inicia en el kilómetro 96,77 y se extiende por 1 km hasta el kilómetro 97,77, pasando por el puente sobre el río Naranjo.

El tramo presenta una velocidad reglamentaria de 80 km/h, ausencia de espaldón y 2 carriles en total de aproximadamente 3,31 m de ancho.

El registro de choques viales del 2012 al 2014 presentó 27 incidentes, segmentados en 1 herido grave, 7 heridos leves y 19 con solo daños materiales. Estos eventos categorizados según el usuario más crítico en el evento se segmentan en 3 con motocicleta, 14 con vehículo liviano, 1 en autobús, 1 vehículo pesado y 8 en la categoría de otros.

De los tipos de choques viales registrados sobresalen 1 objeto sobre vehículo, 3 salidas de la vía y 1 vuelco; de los cuales, las posiciones de colisión más recurrentes fueron 17 por detrás y 4 de costado.

Los hallazgos encontrados fueron:

- Velocidad restringida de 60 km/h no responde a las condiciones geométricas que propician velocidades de operación registradas superiores a 100 km/h.

- Tramo extenso rectilíneo en pendiente.

Ante los distintos hallazgos, se propone:

- Colocar delineadores para delimitar carriles en sentido opuesto, esto con el fin de canalizar e incentivar la reducción de la velocidad de operación.
- Colocar bandas alertadoras que aumenten la atención de los conductores.
- Colocar bandas rugosas en espaldón para alertar ante salida de vía.

5.3.6 Segmento 184

El segmento 184 inicia en el kilómetro 101 y se extiende por 2 km hasta el kilómetro 103, pasando frente al Proyecto Térmico Garabito y el puente sobre el río Ciruelas.

El tramo presenta una velocidad reglamentaria de 60 km/h, ausencia de espaldón y 2 carriles en total de aproximadamente 3,23 m de ancho.

El registro de choques viales del 2012 al 2014 presentó 22 incidentes, segmentados en 1 herido grave, 7 heridos leves y 14 con solo daños materiales. Estos eventos categorizados según el usuario más crítico en el evento se segmentan en 3 con motocicleta, 12 con vehículo liviano, 1 en autobús, 3 vehículo pesado y 3 en la categoría de otros.

De los tipos de choques viales registrados sobresalen 1 atropello animal, 3 colisiones con objeto fijo, 2 salidas de la vía y 2 vuelcos; de los cuales, las posiciones de colisión más recurrentes fueron 7 por detrás y 4 de frente.

Los hallazgos encontrados fueron:

- Velocidad restringida de 60 km/h no responde a las condiciones geométricas que propician velocidades de operación registradas superiores a 80 km/h.
- Tramo plano con curva de radio amplio y árboles en las márgenes.
- Grada entre carretera y margen.
- Acceso de vehículos pesados en Proyecto Térmico Garabito.

Ante los distintos hallazgos, se propone:

- Colocar delineadores para delimitar carriles en sentido opuesto, esto con el fin de canalizar e incentivar la reducción de la velocidad de operación.

- Colocar bandas alertadoras que aumenten la atención de los conductores.
- Colocar bandas rugosas en espaldón para alertar ante salida de vía.
- Eliminar árboles aledaños a la vía o colocar sistemas de contención vehicular diseñado para evitar colisión.

5.3.7 Segmento 193

El segmento 193 inicia en el kilómetro 109 y se extiende por 0,71 km hasta el kilómetro 109,71, pasando frente al restaurante La Cuenca y el puente sobre el río Aranjuez.

El tramo presenta una velocidad reglamentaria de 80 km/h, ausencia de espaldón y 2 carriles en total de aproximadamente 3,28 m de ancho.

El registro de choques viales del 2012 al 2014 presentó 17 incidentes, segmentados en 1 fallecido, 3 heridos leves y 13 con solo daños materiales. Estos eventos categorizados según el usuario más crítico en el evento se segmentan en 1 con motocicleta, 11 con vehículo liviano, 2 vehículo pesado y 3 en la categoría de otros.

De los tipos de choques viales registrados sobresalen 1 atropello animal, 1 objeto sobre vehículo y 2 salidas de la vía; de los cuales, las posiciones de colisión más recurrentes fueron 8 por detrás y 5 de frente.

Los hallazgos encontrados fueron:

- Visibilidad deficiente por alineamiento horizontal curvo.
- Tramos antes y después de segmento en curva son rectilíneos, planos y extensos, por lo que se percibieron altas velocidad de operación.
- Márgenes al puente río Aranjuez desprotegidas.

Ante los distintos hallazgos, se propone:

- Colocar delineadores para delimitar carriles en sentido opuesto, esto con el fin de canalizar e incentivar la reducción de la velocidad de operación y evitar adelantamiento.
- Colocar bandas alertadoras que aumenten la atención de los conductores.
- Colocar bandas rugosas en espaldón para alertar ante salida de vía.

- Colocar sistemas de contención vehicular en aproximaciones al puente sobre el río Aranjuez.

5.3.8 Segmento 204

El segmento 204 inicia en el kilómetro 118 y se extiende por 1 km hasta el kilómetro 119, aledaño a Judas de Chomes.

El tramo presenta una velocidad reglamentaria de 60 km/h, con zona libre reducida insuficiente para que un vehículo salga completo de la vía y 2 carriles en total de aproximadamente 3,21 m de ancho.

El registro de choques viales del 2012 al 2014 presentó 15 incidentes, segmentados en 1 herido grave, 3 heridos leves y 9 con solo daños materiales. Estos eventos categorizados según el usuario más crítico en el evento se segmentan en 3 con motocicleta, 9 con vehículo liviano, 2 en autobús y 1 vehículo pesado.

De los tipos de choques viales registrados sobresalen 1 colisión con objeto fijo, 2 objetos sobre vehículo y 3 salidas de la vía; de los cuales, las posiciones de colisión más recurrentes fueron 5 de frente, 4 por detrás y 3 en ángulo recto.

Los hallazgos encontrados fueron:

- Visibilidad deficiente por alineamiento vertical ondulante.
- Segmento rectilíneo con velocidad de operación cercano a 100 km/h.
- Márgenes con árboles.
- Zona de no adelantamiento irrespetada por usuarios.

Ante los distintos hallazgos, se propone:

- Colocar delineadores para delimitar carriles en sentido opuesto, esto con el fin de canalizar e incentivar la reducción de la velocidad de operación y evitar adelantamiento.
- Colocar bandas alertadoras que aumenten la atención de los conductores.
- Colocar bandas rugosas en espaldón para alertar ante salida de vía.
- Generar zonas de adelantamiento alternado por sentido.

5.3.9 Segmento 209

El segmento 209 inicia en el kilómetro 122 y se extiende por 1 km hasta el kilómetro 123, atravesando el pueblo de Malinche.

El tramo presenta una velocidad reglamentaria de 60 km/h, con zona libre reducida insuficiente para que un vehículo salga completo de la vía y 2 carriles en total de aproximadamente 3,16 m de ancho.

El registro de choques viales del 2012 al 2014 presentó 31 incidentes, segmentados en 1 fallecido, 7 heridos leves y 23 con solo daños materiales. Estos eventos categorizados según el usuario más crítico en el evento se segmentan en 1 con bicicleta, 2 con motocicleta, 12 con vehículo liviano, 5 en autobús, 4 con vehículo pesado y 7 en categoría de otros.

De los tipos de choques viales registrados sobresalen 1 atropello de peatón, 1 colisión con bicicleta, 1 objeto sobre vehículo y 4 salidas de la vía; de los cuales, las posiciones de colisión más recurrentes fueron 17 por detrás, 4 de costado y, en igual magnitud, 3 en ángulo recto y de frente.

Los hallazgos encontrados fueron:

- Segmento rectilíneo con velocidad de operación cercano a 80 km/h.
- Márgenes de vía habitadas por pueblo de Malinche.
- Señalamiento de zona escolar inconsistente con geometría de la vía.

Ante los distintos hallazgos, se propone:

- Colocar delineadores para delimitar carriles en sentido opuesto, esto con el fin de canalizar e incentivar la reducción de la velocidad de operación y evitar adelantamiento.
- Colocar bandas alertadoras que aumenten la atención de los conductores.
- Colocar bandas rugosas en espaldón para alertar ante salida de vía.
- Colocar postes abatibles en aproximación de zona escolar y canalizar peatones hacia cruce peatonal.

5.3.10 Segmento 213

El segmento 213 inicia en el kilómetro 126 y se extiende por 0,79 km hasta el kilómetro 126,79, pasando por el puente sobre el río Lagarto.

El tramo presenta una velocidad reglamentaria de 60 km/h, con zona libre reducida insuficiente para que un vehículo salga completo de la vía y 2 carriles en total de aproximadamente 3,41 m de ancho.

El registro de choques viales del 2012 al 2014 presentó 11 incidentes, segmentados en 1 fallecido, 1 herido grave, 2 heridos leves y 7 con solo daños materiales. Estos eventos categorizados según el usuario más crítico en el evento se segmentan en 1 con motocicleta, 7 con vehículo liviano y 3 con la categoría de otros.

Los 11 choques registrados fueron colisiones entre vehículos; de los cuales, las posiciones de colisión más recurrentes fueron 5 por detrás, 2 en ángulo recto y 2 lateral en sentido contrario de circulación.

Los hallazgos encontrados fueron:

- Segmento rectilíneo con pendiente propicia velocidad de operación cercana a 90 km/h.
- Zona de no adelantamiento irrespetada por usuarios.
- Acceso a Ruta Nacional 605 aledaño a puente sobre el río Lagarto sin carril de aceleración ni desaceleración.

Ante los distintos hallazgos, se propone:

- Colocar delineadores para delimitar carriles en sentido opuesto, esto con el fin de canalizar e incentivar la reducción de la velocidad de operación y evitar adelantamiento.
- Colocar bandas alertadoras que aumenten la atención de los conductores.
- Generar carriles de aceleración y desaceleración para conexión con Ruta Nacional 605.

5.3.11 Segmento 220

El segmento 220 inicia en el kilómetro 133 y se extiende por 1 km hasta el kilómetro 134, pasando por el pueblo de Arizona y el puente sobre el río Cañamazo.

El tramo presenta una velocidad reglamentaria de 80 km/h, ausencia de espaldón y 2 carriles en total de aproximadamente 3,4 m de ancho.

El registro de choques viales del 2012 al 2014 presentó 10 incidentes, segmentados en 1 fallecido, 1 herido leve y 8 con solo daños materiales. Estos eventos categorizados según el usuario más crítico en el evento se segmentan en 1 con motocicleta, 2 con vehículo liviano, 1 en autobús y 6 con la categoría de otros.

De los tipos de choques viales registrados sobresalen 1 atropello a peatón y 1 salida de la vía; de los cuales, las posiciones de colisión más recurrentes fueron 5 por detrás y 2 en ángulo recto.

Los hallazgos encontrados fueron:

- Segmento rectilíneo con pendiente plana propicia altas velocidades de operación.
- Zona de no adelantamiento irrespetada por usuarios.

Ante los distintos hallazgos, se propone:

- Colocar delineadores para delimitar carriles en sentido opuesto, esto con el fin de canalizar e incentivar la reducción de la velocidad de operación y evitar adelantamiento.
- Colocar bandas alertadoras que aumenten la atención de los conductores.
- Colocar bandas rugosas en espaldón para alertar ante salida de vía.
- Canalizar maniobras hacia y desde accesos mediante carriles de giro, carriles de aceleración y desaceleración.

5.3.12 Segmento 235

El segmento 235 inicia en el kilómetro 149,4 y se extiende por 0,93 km hasta el kilómetro 150,33, pasando por el pueblo de Jesús Abajo hasta el puente sobre el río Lajas.

El tramo presenta una velocidad reglamentaria de 60 km/h, con zona libre suficiente para que un vehículo salga completo de la vía y 2 carriles en total de aproximadamente 3,41 m de ancho.

El registro de choques viales del 2012 al 2014 presentó 5 incidentes, segmentados en 1 fallecido, 1 herido grave, 1 herido leve y 2 con solo daños materiales. Estos eventos categorizados según el usuario más crítico en el evento se segmentan en 1 con bicicleta, 1 con motocicleta, 1 en autobús, 1 en vehículo pesado y 1 con la categoría de otros.

De los tipos de choques viales registrados sobresalen 1 colisión con bicicleta, 1 colisión con objeto fijo, 1 salida de la vía y 1 vuelco; de los cuales, las posiciones de colisión fueron recto, de costado y de frente.

Los hallazgos encontrados fueron:

- Segmento rectilíneo con pendiente plana propicia velocidad de operación superior a 90 km/h.
- Márgenes de vía habitadas por pueblo de Jesús Abajo.
- Señalamiento de zona escolar inconsistente con geometría de la vía.
- Zona de no adelantamiento irrespetada por usuarios.
- Parada de autobús sobre vía.

Ante los distintos hallazgos, se propone:

- Colocar delineadores para delimitar carriles en sentido opuesto, esto con el fin de canalizar e incentivar la reducción de la velocidad de operación y evitar adelantamiento.
- Colocar bandas alertadoras que aumenten la atención de los conductores.
- Colocar bandas rugosas en espaldón para alertar ante salida de vía.
- Colocar postes abatibles en aproximación de zona escolar y canalizar peatones hacia cruce peatonal.
- Generar bahía de autobús con carril de aceleración y desaceleración.

5.3.13 Segmento 237

El segmento 237 inicia en el kilómetro 149,4 y se extiende por 0,93 km hasta el kilómetro 150,33, pasando por el pueblo de Gotera.

El tramo presenta una velocidad reglamentaria de 60 km/h, con zona libre suficiente para que un vehículo salga completo de la vía y 2 carriles en total de aproximadamente 3,41 m de ancho.

El registro de choques viales del 2012 al 2014 presentó 8 incidentes, segmentados en 1 fallecido, 1 herido grave, 1 herido leve y 5 con solo daños materiales. Estos eventos categorizados según el usuario más crítico en el evento se segmentan en 1 con motocicleta, 1 con vehículo liviano y 6 con la categoría de otros.

De los tipos de choques viales registrados sobresalen 4 salidas de la vía y 1 vuelco; de los cuales, las posiciones de colisión más recurrentes fueron 2 por detrás y 1 colisión en ángulo recto, de costado y de frente.

Los hallazgos encontrados fueron:

- Segmento rectilíneo con pendiente plana propicia velocidad de operación superior a 70 km/h.
- Márgenes de vía habitadas por pueblo de Gotera
- Señalamiento de zona escolar inconsistente con geometría de la vía.
- Zona de no adelantamiento irrespetada por usuarios.

Ante los distintos hallazgos, se propone:

- Colocar delineadores para delimitar carriles en sentido opuesto, esto con el fin de canalizar e incentivar la reducción de la velocidad de operación y evitar adelantamiento.
- Colocar bandas alertadoras que aumenten la atención de los conductores.
- Colocar bandas rugosas en espaldón para alertar ante salida de vía.
- Colocar postes abatibles en aproximación de zona escolar y canalizar peatones hacia cruce peatonal.
- Canalizar maniobras hacia y desde accesos mediante carriles de giro, carriles de aceleración y desaceleración.

5.3.14 Segmento 240

El segmento 240 inicia en el kilómetro 149,4 y se extiende por 0,93 km hasta el kilómetro 150,33, pasando por el pueblo de San Miguel y el puente sobre el río Higuerón.

El tramo presenta una velocidad reglamentaria de 60 km/h, con zona libre insuficiente para que un vehículo salga completo de la vía y 2 carriles en total de aproximadamente 3,46 m de ancho.

El registro de choques viales del 2012 al 2014 presentó 6 incidentes, segmentados en 1 fallecido, 2 heridos graves, 2 heridos leves y 1 con solo daños materiales. Estos eventos categorizados según el usuario más crítico en el evento se segmentan en 1 con bicicleta, 2 con motocicleta y 3 en vehículo liviano.

De los tipos de choques viales registrados sobresalen 1 colisión con bicicleta y 2 colisiones con objeto fijo; de los cuales, las posiciones de colisión fueron de frente, detrás y lateral en sentido contrario a la circulación.

Los hallazgos encontrados fueron:

- Segmento rectilíneo con pendiente plana propicia altas velocidades de operación.
- Márgenes de vía habitadas por pueblo de San Miguel.
- Señalamiento de zona escolar inconsistente con geometría de la vía.
- Zona de no adelantamiento irrespetada por usuarios.
- Parada de autobús sobre vía.

Ante los distintos hallazgos, se propone:

- Colocar delineadores para delimitar carriles en sentido opuesto, esto con el fin de canalizar e incentivar la reducción de la velocidad de operación y evitar adelantamiento.
- Colocar bandas alertadoras que aumenten la atención de los conductores.
- Colocar bandas rugosas en espaldón para alertar ante salida de vía.
- Colocar postes abatibles en aproximación de zona escolar y canalizar peatones hacia cruce peatonal.
- Canalizar maniobras hacia y desde accesos mediante carriles de giro, carriles de aceleración y desaceleración.
- Generar bahía de autobús con carril de aceleración y desaceleración.

5.3.15 Segmento 247

El segmento 247 inicia en el kilómetro 161,75 y se extiende por 1,25 km hasta el kilómetro 163, posterior al pueblo de Jabilla Abajo.

El tramo presenta una velocidad reglamentaria de 60 km/h, con zona libre suficiente para que un vehículo salga completo de la vía y 2 carriles en total de aproximadamente 3,3 m de ancho.

El registro de choques viales del 2012 al 2014 presentó 15 incidentes, segmentados en 1 fallecido, 1 herido grave, 3 herido leve y 10 con solo daños materiales. Estos eventos categorizados según el usuario más crítico en el evento se segmentan en 1 con bicicleta, 4 en vehículo liviano, 1 en autobús, 1 en vehículo pesado y 8 con la categoría de otros.

De los tipos de choques viales registrados sobresalen 1 atropello a peatón, 1 colisión con bicicleta y 1 salida de la vía; de los cuales, las posiciones de colisión predominantes fueron 4 laterales en sentido contrario a la circulación, 3 por detrás y 3 en ángulo recto.

Los hallazgos encontrados fueron:

- Segmento rectilíneo con velocidades de operación registradas mayores a 90 km/h.
- Márgenes de vía con comercios y viviendas.
- Zona de no adelantamiento irrespetada por usuarios.
- Parada de autobús sobre vía.

Ante los distintos hallazgos, se propone:

- Colocar delineadores para delimitar carriles en sentido opuesto, esto con el fin de canalizar e incentivar la reducción de la velocidad de operación y evitar adelantamiento.
- Colocar bandas alertadoras que aumenten la atención de los conductores.
- Colocar bandas rugosas en espaldón para alertar ante salida de vía.
- Generar bahía de autobús con carril de aceleración y desaceleración.

5.3.16 Segmento 258

El segmento 258 inicia en el kilómetro 172 y se extiende por 1 km hasta el kilómetro 173, aledaño al intercambio hacia Bijagua.

Este segmento fue intervenido en la ampliación de la vía entre Cañas y Liberia, por lo que no se cuenta con registros geométricos, sin embargo, se identificaron posibilidades de mejora a la infraestructura existente.

El registro de choques viales del 2012 al 2014 presentó 9 incidentes, segmentados en 1 fallecido y 8 con solo daños materiales. Estos eventos categorizados según el usuario más crítico en el evento se segmentan en 1 con motocicleta, 3 en vehículo liviano y 5 con la categoría de otros.

El total de choques registrados fue de tipo colisión entre vehículos; de los cuales, las posiciones de colisión predominantes fueron 6 por detrás y 2 de costado.

Los hallazgos encontrados fueron:

- Segmento rectilíneo con velocidad de operación registrada superior a 100 km/h.
- Restricciones de velocidad inconsistentes con geometría de la vía.
- Sistema de contención vehicular semirrígido con postes anclados en concreto.
- Luminarias en mediana generan discontinuidad en el sistema de contención vehicular.

Ante los distintos hallazgos, se propone:

- Diseño e instalación apropiado de sistema de contención vehicular.
- Utilizar dispositivos apropiados para incluir luminarias en mediana.

5.3.17 Segmento 263

El segmento 263 inicia en el kilómetro 176 y se extiende por 2 km hasta el kilómetro 178, posterior al puente sobre el río Blanco.

Este segmento fue intervenido en la ampliación de la vía entre Cañas y Liberia, por lo que no se cuenta con registros geométricos, sin embargo, se identificaron posibilidades de mejora a la infraestructura existente.

El registro de choques viales del 2012 al 2014 presentó 11 incidentes, segmentados en 1 fallecido, 2 heridos graves, 2 heridos leves y 6 con solo daños materiales. Estos eventos categorizados según el usuario más crítico en el evento se segmentan en 4 con vehículo liviano y 7 con la categoría de otros.

De los tipos de choques registrados sobresalen 1 atropello a peatones, 1 atropello animal, 1 colisión con objeto fijo y 2 vuelcos; de los cuales, las posiciones de colisión predominantes fueron 3 por detrás y 2 de frente.

Los hallazgos encontrados fueron:

- Segmento rectilíneo con velocidad de operación registrada superior a 120 km/h.
- Restricciones de velocidad inconsistentes con geometría de la vía.
- Sistema de contención vehicular mal instalados y sin un diseño apropiado.
- Luminarias en mediana generan discontinuidad en el sistema de contención vehicular.
- Atropello de animales.

Ante los distintos hallazgos, se propone:

- Diseño e instalación apropiado de sistema de contención vehicular.
- Utilizar dispositivos apropiados para incluir luminarias en mediana.
- Canalización de animales hacia cruces de fauna y restringir su acceso a la vía.

5.3.18 Segmento 269

El segmento 269 inicia en el kilómetro 183 y se extiende por 1 km hasta el kilómetro 184, posterior al puente sobre el río Villa Vieja.

Este segmento fue intervenido en la ampliación de la vía entre Cañas y Liberia, por lo que no se cuenta con registros geométricos, sin embargo, se identificaron posibilidades de mejora a la infraestructura existente.

El registro de choques viales del 2012 al 2014 presentó 6 incidentes, segmentados en 1 fallecido, 1 herido leve y 4 con solo daños materiales. Estos eventos categorizados según el usuario más crítico en el evento se segmentan en 4 con vehículo liviano y 7 con la categoría de otros.

De los tipos de choques registrados sobresalen 1 atropello a peatones y 1 atropello animal; de los cuales, las posiciones de colisión predominantes fueron 2 por detrás y 2 de frente.

Los hallazgos encontrados fueron:

- Segmento rectilíneo propician altas velocidades de operación.
- Restricciones de velocidad inconsistentes con geometría de la vía.
- Sistema de contención vehicular mal instalados, colisionados y sin un diseño apropiado.
- Luminarias en mediana generan discontinuidad en el sistema.
- Ciclovía y acera discontinua y desprotegida.

Ante los distintos hallazgos, se propone:

- Diseño e instalación apropiado de sistema de contención vehicular.
- Utilizar dispositivos apropiados para incluir luminarias en mediana.
- Canalización de animales hacia cruces de fauna y restringir su acceso a la vía.
- Proteger ciclovía y acera mediante un sistema de contención vehicular rígido y conectar discontinuidades de ciclovía según las trayectorias ciclistas y peatonales.

5.3.19 Segmento 276

El segmento 276 inicia en el kilómetro 190,7 y se extiende por 1,3 km hasta el kilómetro 192, posterior al puente sobre el río Piedras.

Este segmento fue intervenido en la ampliación de la vía entre Cañas y Liberia, por lo que no se cuenta con registros geométricos, sin embargo, se identificaron posibilidades de mejora a la infraestructura existente.

El registro de choques viales del 2012 al 2014 presentó 9 incidentes, segmentados en 3 heridos graves, 2 heridos leves y 4 con solo daños materiales. Estos eventos categorizados según el usuario más crítico en el evento se segmentan en 1 con motocicleta, 4 con vehículo liviano, 1 con autobús y 3 con la categoría de otros.

De los tipos de choques registrados sobresalen 1 colisión con objeto fijo y 1 colisión sobre vehículo; de los cuales, las posiciones de colisión predominantes fueron 3 de frente y 2 por detrás.

Los hallazgos encontrados fueron:

- Restricciones de velocidad inconsistentes con geometría de la vía, se propician altas velocidades de operación.
- Sistema de contención vehicular mal instalados y sin un diseño apropiado.
- Luminarias en mediana generan discontinuidad en el sistema.
- Ciclovía y acera discontinua y desprotegida.

Ante los distintos hallazgos, se propone:

- Diseño e instalación apropiado de sistema de contención vehicular.
- Utilizar dispositivos apropiados para incluir luminarias en mediana.
- Proteger ciclovía y acera mediante un sistema de contención vehicular rígido y conectar discontinuidades de ciclovía según las trayectorias ciclistas y peatonales.

5.3.20 Segmento 280

El segmento 280 inicia en el kilómetro 190,7 y se extiende por 1,3 km hasta el kilómetro 192, posterior al puente sobre el río Piedras.

Este segmento fue intervenido en la ampliación de la vía entre Cañas y Liberia, por lo que no se cuenta con registros geométricos, sin embargo, se identificaron posibilidades de mejora a la infraestructura existente.

El registro de choques viales del 2012 al 2014 presentó 8 incidentes, segmentados en 1 fallecido, 1 herido leve y 6 con solo daños materiales. Estos eventos categorizados según el usuario más crítico en el evento se segmentan en 1 con motocicleta, 5 con vehículo liviano, 1 con vehículo pesado y 1 con la categoría de otros.

El total de los choques fue de tipo colisión entre vehículos; de los cuales, las posiciones de colisión predominantes fueron 4 por detrás y 3 de frente.

Los hallazgos encontrados fueron:

- Restricciones de velocidad inconsistentes con geometría de la vía, se propician altas velocidades de operación.
- Sistema de contención vehicular mal instalados, sin esviaje y sin un diseño apropiado.

- Luminarias en mediana generan discontinuidad en el sistema.
- Cunetas con pendientes riesgosas.

Ante los distintos hallazgos, se propone:

- Diseño e instalación apropiado de sistema de contención vehicular.
- Utilizar dispositivos apropiados para incluir luminarias en mediana.
- Cunetas con pendiente segura o cubiertas por rejilla.

5.3.21 Segmento 290

El segmento 290 inicia en el kilómetro 205 y se extiende por 1 km hasta el kilómetro 206, aledaño a La Caraña y al puente sobre el río La Caraña.

Este segmento fue intervenido en la ampliación de la vía entre Cañas y Liberia, por lo que no se cuenta con registros geométricos, sin embargo, se identificaron posibilidades de mejora a la infraestructura existente.

El registro de choques viales del 2012 al 2014 presentó 6 incidentes, segmentados en 2 fallecidos, 1 herido grave, 1 herido leve y 2 con solo daños materiales. Estos eventos categorizados según el usuario más crítico en el evento se segmentan en 1 con motocicleta, 2 con vehículo liviano, 2 con autobús y 1 con vehículo pesado.

El total de los choques fue de tipo colisión entre vehículos; de los cuales, el ángulo predominante fue de tipo por detrás con 4 eventos.

Los hallazgos encontrados fueron:

- Restricciones de velocidad inconsistentes con geometría de la vía, se propician altas velocidades de operación.
- Sistema de contención vehicular mal instalados y sin un diseño apropiado.
- Luminarias en mediana generan discontinuidad en el sistema.
- Ciclovía y acera discontinua y desprotegida.
- Cunetas con pendientes riesgosas.

Ante los distintos hallazgos, se propone:

- Diseño e instalación apropiado de sistema de contención vehicular.
- Utilizar dispositivos apropiados para incluir luminarias en mediana.
- Cunetas con pendiente segura o cubiertas por rejilla.
- Proteger ciclovía y acera mediante un sistema de contención vehicular rígido y conectar discontinuidades de ciclovía según las trayectorias ciclistas y peatonales.

5.3.22 Segmento 295

El segmento 295 inicia en el kilómetro 210 y se extiende por 1 km hasta el kilómetro 211, aledaño a Riteve de Liberia y al puente sobre el río La Arena.

Este segmento fue intervenido en la ampliación de la vía entre Cañas y Liberia, por lo que no se cuenta con registros geométricos, sin embargo, se identificaron posibilidades de mejora a la infraestructura existente.

El registro de choques viales del 2012 al 2014 presentó 33 incidentes, segmentados en 1 fallecido, 1 herido grave, 1 herido leve y 30 con solo daños materiales. Estos eventos categorizados según el usuario más crítico en el evento se segmentan en 2 con motocicleta, 8 con vehículo liviano, 1 en autobús, 3 con vehículo pesado y 19 con la categoría de otros.

De los tipos de choques registrados sobresalen 1 atropello a peatón, 1 caída de algún ocupante, 5 colisiones con objeto fijo y 1 objeto sobre vehículo; de los cuales, las posiciones de colisión predominantes fueron 14 por detrás y 4 de frente.

Los hallazgos encontrados fueron:

- Restricciones de velocidad inconsistentes con geometría de la vía, se propician altas velocidades de operación.
- Sistema de contención vehicular mal instalados y sin un diseño apropiado.
- Luminarias en mediana generan discontinuidad en el sistema.
- Acera con sistema de contención vehicular semirrígido.

Ante los distintos hallazgos, se propone:

- Diseño e instalación apropiado de sistema de contención vehicular.
- Utilizar dispositivos apropiados para incluir luminarias en mediana.

- Proteger acera mediante un sistema de contención vehicular rígido.

5.3.23 Segmento 296

El segmento 296 inicia en el kilómetro 211 y se extiende por 1 km hasta el kilómetro 212, aledaño al Mall Plaza Liberia y al puente sobre el río Liberia.

Este segmento fue intervenido en la ampliación de la vía entre Cañas y Liberia, por lo que no se cuenta con registros geométricos, sin embargo, se identificaron posibilidades de mejora a la infraestructura existente.

El registro de choques viales del 2012 al 2014 presentó 14 incidentes, segmentados en 1 fallecido y 12 con solo daños materiales. Estos eventos categorizados según el usuario más crítico en el evento se segmentan en 1 con motocicleta, 3 con vehículo liviano, 1 en autobús y 9 con la categoría de otros.

De los tipos de choques registrados sobresalen 1 atropello a peatón, 1 caída de algún ocupante, 1 salida de la vía y 1 vuelco; de los cuales, las posiciones de colisión predominantes fueron 6 por detrás y 3 de costado.

Los hallazgos encontrados fueron:

- Restricciones de velocidad inconsistentes con geometría de la vía, se propician altas velocidades de operación.
- Sistema de contención vehicular mal instalados y sin un diseño apropiado.
- Luminarias en mediana generan discontinuidad en el sistema.
- Acera con sistema de contención vehicular semirrígido.

Ante los distintos hallazgos, se propone:

- Diseño e instalación apropiado de sistema de contención vehicular.
- Utilizar dispositivos apropiados para incluir luminarias en mediana.
- Proteger acera mediante un sistema de contención vehicular rígido.

5.3.24 Segmento 297

El segmento 297 inicia en el kilómetro 212 y se extiende por 1 km hasta el kilómetro 213, aledaño al Hotel Boyeros y a la ciudad de Liberia.

Este segmento fue intervenido en la ampliación de la vía entre Cañas y Liberia, por lo que no se cuenta con registros geométricos, sin embargo, se identificaron posibilidades de mejora a la infraestructura existente.

El registro de choques viales del 2012 al 2014 presentó 31 incidentes, segmentados en 1 herido grave, 2 heridos leves y 28 con solo daños materiales. Estos eventos categorizados según el usuario más crítico en el evento se segmentan en 1 con bicicleta, 1 con motocicleta, 9 con vehículo liviano, 2 en autobús y 18 con la categoría de otros.

De los tipos de choques registrados sobresalen 1 atropello a peatón, 1 colisión con bicicleta y 1 vuelco; de los cuales, las posiciones de colisión predominantes fueron 10 por detrás, 9 de costado y 7 en ángulo recto.

Los hallazgos encontrados fueron:

- Restricciones de velocidad inconsistentes con geometría de la vía, se propician altas velocidades de operación.
- Luminarias en mediana generan discontinuidad en el sistema.
- Aproximación a paso a desnivel sin amortiguadores de impacto.

Ante los distintos hallazgos, se propone:

- Diseño e instalación apropiado de sistema de contención vehicular.
- Utilizar dispositivos apropiados para incluir luminarias en mediana.

5.3.25 Segmento 302

El segmento 302 inicia en el kilómetro 217 y se extiende por 0,5 km hasta el kilómetro 217,5, pasando por el pueblo de Guadalupe y la Arrocería Sabanero.

El tramo presenta una velocidad reglamentaria de 60 km/h, con zona libre reducida insuficiente para que un vehículo salga completo de la vía y 2 carriles en total de aproximadamente 3,33 m de ancho.

El registro de choques viales del 2012 al 2014 presentó 7 incidentes, segmentados en 4 heridos graves, 2 heridos leves y 1 con solo daños materiales. Estos eventos categorizados según el usuario más crítico en el evento se segmentan en 2 con bicicleta, 3 con vehículo liviano y 2 en la categoría de otros.

De los tipos de choques registrados sobresalen 1 atropello a peatón, 2 colisión con bicicleta y 1 colisión con objeto fijo; de los cuales, el ángulo de colisión predominante fue de costado con 3 eventos.

Los hallazgos encontrados fueron:

- Segmento rectilíneo con pendiente plana propicia velocidades de operación registradas superiores a 80 km/h.
- Velocidad reglamentaria de 80 km/h junto a reducción de velocidad por zona escolar es inconsistente.
- Márgenes de vía habitadas por pueblo de Guadalupe, comercios e industria.
- Señalamiento de zona escolar inconsistente con geometría de la vía.
- Zona de no adelantamiento irrespetada por usuarios.
- Parada de autobús sobre vía.
- Ausencia de ciclovía ante presencia de ciclistas.

Ante los distintos hallazgos, se propone:

- Colocar delineadores para delimitar carriles en sentido opuesto, esto con el fin de canalizar e incentivar la reducción de la velocidad de operación y evitar adelantamiento.
- Colocar bandas alertadoras que aumenten la atención de los conductores.
- Colocar bandas rugosas en espaldón para alertar ante salida de vía.
- Colocar postes abatibles en aproximación de zona escolar y canalizar peatones hacia cruce peatonal.
- Canalizar maniobras hacia y desde accesos mediante carriles de giro, carriles de aceleración y desaceleración.
- Generar bahía de autobús con carril de aceleración y desaceleración.
- Diseñar ciclovía.

5.3.26 Segmento 307

El segmento 307 inicia en el kilómetro 221 y se extiende por 1 km hasta el kilómetro 222.

El tramo presenta una velocidad reglamentaria de 80 km/h, con zona libre suficiente para que un vehículo salga completo de la vía y 2 carriles en total de aproximadamente 3,46 m de ancho.

El registro de choques viales del 2012 al 2014 presentó 2 incidentes, segmentados en 1 fallecido y 1 herido grave. Estos eventos categorizados según el usuario más crítico en el evento se segmentan en 1 con motocicleta y 1 con vehículo liviano.

Ambos eventos fueron de tipo salida de vía y el ángulo de colisión de costado.

Los hallazgos encontrados fueron:

- Segmento rectilíneo con pendiente plana propicia altas velocidades de operación.
- Ausencia de espaldón.

Ante los distintos hallazgos, se propone:

- Colocar delineadores para delimitar carriles en sentido opuesto, esto con el fin de canalizar e incentivar la reducción de la velocidad de operación y evitar adelantamiento.
- Colocar bandas alertadoras que aumenten la atención de los conductores.
- Colocar bandas rugosas en espaldón para alertar ante salida de vía.
- Construcción de espaldón.

5.3.27 Segmento 312

El segmento 312 inicia en el kilómetro 226 y se extiende por 1 km hasta el kilómetro 227, posterior al puente sobre el río Irigaray.

El tramo presenta una velocidad reglamentaria de 80 km/h, con zona libre reducida insuficiente para que un vehículo salga completo de la vía y 2 carriles en total de aproximadamente 3,43 m de ancho.

El registro de choques viales del 2012 al 2014 presentó 2 incidentes, segmentados en 1 fallecido y 1 herido leve. Estos eventos categorizados según el usuario más crítico en el evento se segmentan en 1 con vehículo liviano y 1 en categoría otros equivalente a peatón.

Los eventos registrados fueron de tipo atropello de peatón y salida de vía, con ángulos de colisión desconocidos.

Los hallazgos encontrados fueron:

- Segmento rectilíneo con pendiente plana propicia altas velocidades de operación.
- Ausencia de espaldón e iluminación.

Ante los distintos hallazgos, se propone:

- Colocar bandas alertadoras que aumenten la atención de los conductores.
- Colocar bandas rugosas en espaldón para alertar ante salida de vía.
- Colocar captaluces que mejoren visibilidad durante la noche.
- Construcción de espaldón.

5.3.28 Segmento 318

El segmento 318 inicia en el kilómetro 226 y se extiende por 1 km hasta el kilómetro 227, posterior al puente sobre el río Ahogados.

El tramo presenta una velocidad reglamentaria de 80 km/h, con zona libre suficiente para que un vehículo salga completo de la vía y 2 carriles en total de aproximadamente 3,61 m de ancho.

El registro de choques viales del 2012 al 2014 presentó 4 incidentes, segmentados en 1 fallecido, 1 herido leve y 2 con solo daños materiales. Estos eventos categorizados según el usuario más crítico en el evento se segmentan en 1 con motocicleta, 2 con vehículo liviano y 1 en la categoría de otros.

De los tipos de choques registrados sobresalen 1 atropello animal y 1 salida de vía; de los cuales, el ángulo de colisión predominante fue de frente con 2 eventos.

Los hallazgos encontrados fueron:

- Segmento rectilíneo con pendiente plana propicia altas velocidades de operación.
- Ausencia de espaldón e iluminación.

Ante los distintos hallazgos, se propone:

- Colocar bandas alertadoras que aumenten la atención de los conductores.
- Colocar bandas rugosas en espaldón para alertar ante salida de vía.
- Colocar captaluces que mejoren visibilidad durante la noche.
- Construcción de espaldón.

Capítulo 6 . Conclusiones y recomendaciones

6.1 Conclusiones

La identificación de sitios de concentración de choques viales es una labor ineludible para la mejora de la movilidad en Costa Rica, lo que permitiría la ejecución efectiva de los recursos en los sitios con mayor posibilidad de mejora o exceso de frecuencia.

El estudio desarrollado implicó el uso de los métodos reactivos para la identificación de sitios de concentración de choques viales, recomendados por la PIARC (2003) y el AASHTO (2010), documentos ampliamente utilizados como base en los manuales de seguridad vial en el mundo.

Sin embargo, los manuales antes mencionados no consideran la metodología más aplicada en el ámbito científico para alcanzar un nivel mayor de confiabilidad y personalización de los modelos, como lo permite el método de exceso de frecuencia de choques con ajuste de Bayes completo, metodología que se mantiene en el ámbito académico, tanto en Costa Rica como en el mundo.

La estadística Bayesiana permitió identificar 116 segmentos de concentración de choques viales con un nivel de confianza del 95 %, los cuales comprenden una extensión de 90,3 km de la Ruta Nacional 1, lo que representa un 31,5 % de la longitud total de la vía.

Cabe destacar que, 11 segmentos continuos de los 116 segmentos de concentración de choques viales, fueron identificados entre las cercanías de Barranca y 6 km noroeste del intercambio de Cuatro Cruces, condición que representa un gran segmento continuo de concentración de choques de 11,23 km de extensión.

Cada modelo permitió analizar los tramos basado en su accidentabilidad y diversas variables, tomando en consideración que el tramo 1 atraviesa la zona más urbana de la vía, seguido del tramo 2 que corresponde a una vía interurbana y finalmente el tramo 3 que corresponde a una vía rural.

Los modelos consideraron variables geométricas, operativas y funcionales del tránsito, así como características estructurales y funcionales de la estructura de pavimento; esto mediante la incorporación del TPD, longitud de segmento, ancho de carril, zona libre

disponible, tasa de curvatura, ubicación de intercambios, velocidad reglamentaria, IRI y FWD.

Estas variables se obtuvieron mediante el equipo Trident 3D modelo MX-1, equipo de inventario móvil del LanammeUCR, así como mediante bases de datos del MOPT, PITRA-LanammeUCR y el uso de los programas Google Earth y ArcGIS.

El Trident 3D es el equipo más avanzado para realizar inventarios móviles en Costa Rica, por lo que, a pesar de las limitaciones con las que cuenta el equipo, demostró ser un insumo valioso para la generación de modelos de mayor confiabilidad y con una mayor cantidad de variables.

Se evidenció que los registros geométricos de las vías con los que cuenta la Secretaría de Planificación Sectorial del MOPT son inadecuados para la estimación de modelos o realizar un proceso de gestión de activos, ya que son generados de forma rudimentaria, mediante el dibujo a mano de la geometría de la sección y registras por sección de control. Esta tramificación limita caracterizar la vía, ya que presentan longitudes variables a través de una ruta completa, así como extensiones en el rango de kilómetros.

Asociado a los modelos de exceso de frecuencia de choques esperados con ajuste de Bayes completo para choques totales y equivalentes, se evidencia el efecto del uso de suelo, deficiencias geométricas y estado de la estructura de pavimento.

La incorporación de variables funcionales y estructurales asociadas a la estructura de pavimento, mediante el MRI (IRI promedio) y la FWD, resultó significativa con una confianza del 95%. El MRI presentó un coeficiente de 0,15 para el modelo del tramo 2 con choques equivalentes y la FWD un coeficiente de -0,0065 en el tramo 3 con choques totales.

Para el modelo del tramo 2 con choques equivalentes, la variación de la variable MRI_{prom} generó un aumento constante del 15,03% en la frecuencia de choques esperado por unidad de m/km; lo que generó una diferencia en la accidentabilidad del 100,53% entre el MRI_{prom} mínimo registrado en el tramo de 1,69 m/km y máximo de 6,66 m/km.

La variable FWD_{prom} resultó significativa únicamente para el modelo del tramo 3 con choques totales y su tendencia se interpretó como un efecto colateral del confort y la

velocidad de operación, ya que, al presentarse condiciones deficientes en las deflexiones de la estructura de pavimento, la velocidad de operación se reduce.

Las variables IRI y FWD no habían sido utilizadas en los estudios previos con inferencia bayesiana en Costa Rica, esto a pesar de que el PITRA-LanammeUCR genera desde el 2004, de forma bianual, el levantamiento de ambas variables para las rutas nacionales pavimentadas del país.

A pesar de que el TPD es una variable típica en las funciones de desempeño, resalta la magnitud del coeficiente de 6,887, registrado para el modelo del tramo 1 con choques equivalentes. Sobresale el alto nivel de accidentabilidad del tramo, con un 46,87% del total de choques viales registrados y su estrecha relación con el TPD, cuyo valor máximo de toda la vía de 96765 se registra en el tramo 1.

Para el tramo 1 la frecuencia de choques/km esperados contra el TPD presentó un comportamiento exponencial y para valores de TPD entre 90000 vehículos/día y 100000 vehículos/día, pasa de 108,41 choques/km a 223,97 choques/km respectivamente, condición que representa un aumento en la frecuencia de choques/km del 106,59% con un aumento de tan solo 10000 vehículos/día.

Ante el comportamiento del TPD en el tramo 1, se vislumbra la necesidad de intervenir este tramo, en especial, por el alto flujo vehicular que transita la zona y su correlación con la accidentabilidad.

El equipo de inventario móvil permitió generar una medición de ancho de carril para cada una de los 378 segmentos analizados, esto de forma ágil mediante el programa Trimble. Esta herramienta permitió generar el primer modelo en Costa Rica con la cantidad de datos asociados al ancho de carril suficientes para resultar significativa, condición que en estudios previos no ha sido posible reproducir ante la baja variabilidad de los registros.

Los resultados asociados al ancho de carril evidenciaron un aumento en la exposición al riesgo de 39,12% al utilizar anchos de carril de 3,2 m – 3,5 m, con respecto a un ancho de carril en el rango de 3,5 m – 3,7 m.

A pesar de no incluir la velocidad de operación como variable en los modelos, se interpretó que esta generó coeficientes con tendencias atípicas, ya que se presentó mayor

accidentabilidad en segmentos con mayores longitudes de zona libre disponible, donde se asume los usuarios transitan a mayor velocidad de operación.

Esta condición se evidenció al comparar la exposición al riesgo con la frecuencia de choques/km esperados y la variación de las categorías de zona libre disponible para el modelo con choques totales del tramo 3, donde el riesgo aumenta en un 49,44% al pasar de un segmento sin zona libre a uno con una amplitud suficiente para que más de un vehículo pueda salir de la vía por completo.

El efecto evidenciado con la zona libre disponible se asumió como una consecuencia indirecta del aumento en la velocidad de operación en zonas que suman una zona libre disponible amplia y pendiente vertical baja, por lo que propicia el aumento de la velocidad en los vehículos.

La tasa de curvatura representó de forma indirecta el radio de cada segmento, pero generó un comportamiento atípico, donde el riesgo se reduce en un 68,08% para la categoría de curvatura entre 20% y 52%, con respecto a la categoría de 0% a 2%. El comportamiento obtenido a partir del modelo del tramo 3 con choques equivalentes se interpretó como efecto colateral de la velocidad de operación, donde los segmentos con menor tasa de curvatura representan los tramos de vía más rectos y con mayor velocidad de tránsito.

La velocidad reglamentaria presentó coeficientes negativos en los modelos para los casos de mayor velocidad, esto asociado a las deficiencias de los intercambios y accesos, en los que se reduce la velocidad reglamentaria, pero no se propician cambios geométricos que insten al conductor a reducirla, ni se incorporan transiciones apropiadas mediante carriles de aceleración y desaceleración. Este efecto generó la necesidad de incorporar una variable asociada a la presencia de intercambios o intersecciones que conectaran poblados importantes a la vía de estudio, variable que resultó significativa en el modelo con choques totales del tramo 3.

Complementario a los modelos con exceso de frecuencia de choques con análisis bayesiano completo, se implementaron los métodos:

- Frecuencia de choques
- Tasa de choques

- Tasa crítica de choques
- Frecuencia promedio para choques equivalente a solo daños de propiedad (EPDO)
- Exceso de frecuencia de choques esperado con el ajuste de Bayes empírico

Estos métodos fueron implementados con choques totales y equivalentes, lo que permitió realizar la comparación de resultados de forma extensiva, enfocando el análisis en los parámetros de: capacidad de replicabilidad de la jerarquización o priorización de los segmentos con mayor exceso de choques y en la identificación de los segmentos sin valorar la priorización.

Al utilizar el modelo de Bayes completo con choques equivalentes como modelo de referencia, se confirmó que ninguno de los métodos alternos permite jerarquizar correctamente ni identificar los segmentos con mayor posibilidad de mejora o mayor exceso de frecuencia en el tramo 1 y tramo 2. Sin embargo, cabe destacar que los métodos frecuencia de choques, tasas de choques y tasa crítica de choques con datos de choques equivalentes, permitieron replicar a nivel de identificación de segmentos, los resultados del modelo Bayes completo con choques equivalentes con un máximo de 26 aciertos, de 28 segmentos considerados como críticos.

Se interpretó que la similitud de los modelos fue efecto de la homogeneidad en el tramo, la cantidad de segmentos que lo conforman y la cantidad de años de choques viales incorporados a los modelos. Sin embargo, la aplicación de estos métodos con choques equivalentes surgió como propuesta del presente trabajo de investigación, por lo que no se ha identificado este comportamiento en otras investigaciones.

A nivel general se identificaron en los 3 tramos deficiencias en la canalización de movimiento de entrada o salida, tanto en intersecciones, intercambios y paradas de autobús, lo que incentiva que los choques por detrás sea el ángulo más recurrente.

La geometría presenta inconsistencias entre la velocidad reglamentaria y la velocidad de operación, lo que aumenta la exposición al riesgo de peatones y ciclistas, así como los eventos por salida de vía.

Sumado a la geometría deficiente, se evidenciaron sistemas de contención vehicular que no responden a un diseño, certificado de fabricante o norma, ya que se colocan dispositivos

semirrígidos en condiciones que amerita una barrera rígida, sumado a las discontinuidades generadas por luminarias y a las deficientes labores de mantenimiento, donde sobresale el sistema de contención vehicular que divide los flujos vehiculares en los primeros kilómetros de la autopista General Cañas, con espaldón reducido o ausente, y con evidencia de colisión desde las mediciones realizadas en los registros del año 2013, a la fecha.

6.2 Recomendaciones

La planificación de las intervenciones en materia de seguridad vial en Costa Rica debe responder a metodologías científicas, no a interpretaciones de profesionales no capacitados o decisiones políticas, condición que ha marginado la seguridad vial del país a un elemento opcional y no a una obligación en cada una de las etapas de los proyectos viales.

Los diseños geométricos en Costa Rica deben mejorar a un estándar superior al especificado por la SIECA, ya que, a pesar de definir valores mínimos, incluye apartados que permiten omitir las recomendaciones y ajustarse únicamente al presupuesto disponible para la obra, sin considerar las externalidades negativas futuras dentro del análisis financiero.

Sumado a las deficiencias en las guías de diseño, las dependencias del MOPT requieren de mejoras en sus prácticas y capacidades técnicas, ya que es recurrente que la seguridad vial sea omitida o mermada desde los carteles de los proyectos viales, por lo que se genera un círculo vicioso durante la ejecución, funcionamiento y mantenimiento de la vía.

Los estudios y diseños deben considerar a todos los usuarios de las vías, considerando la pirámide invertida de movilidad y la diferenciación clara de conceptos básicos como movilidad y accesibilidad. Estas premisas permitirían evitar nuevas obras similares a la ampliación entre Cañas – Liberia, donde la geometría de 2 carriles anchos por sentido propicia altas velocidades de operación junto a cruces peatonales a nivel y sin la segregación de las aceras, ciclovías y bahías de autobús en rutas marginales.

Existen limitaciones en materia de recolección de información en el país, como se evidenció en la base de datos de choques viales del COSEVI, que para el periodo entre el año 2012 y 2014, presentó el reto de ubicar y georreferenciar manualmente 14430 partes viales, esto basado en la descripción del lugar de los hechos, parámetro poco informativo en la mayoría de los registros. Se suman también las deficiencias en el registro de otras variables presentes

en los partes que permitirían caracterizar los eventos, variables que se categorizan de forma no informativa como “desconocido” u “otros”.

Los datos de movilidad generados por la Secretaría de Planificación Sectorial deben generarse mediante metodologías y equipos que permitan una mejor caracterización de los usuarios, con equipos que registren cantidades por sentido, densidades, colas, velocidades de operación, entre otras variables de forma automática. Actualmente se limitan a registros de TPD por secciones de control, que no permiten realizar un análisis más detallado y generan deficiencias en los modelos causados por la baja variabilidad de los datos, condición que afectó la investigación de Leiva y Agüero (2017) donde el TPD no resultó significativo ante los escasos registros en la ruta Interamericana Sur.

Al realizar mediciones de la velocidad de operación automáticamente en una mayor cantidad de segmentos de la vía, sería posible evidenciar su impacto de forma directa en los modelos, no de forma indirecta mediante la interpretación de otras variables, como lo fueron los efectos asociados a las variables de tasa de curvatura, zona libre disponible y deflectometría (FWD_{prom}).

El uso de equipos de inventario móvil para la modelación en materia de seguridad vial debería ser la norma y no la excepción, ya que demostró ser un insumo importante a la hora de generar variables capaces de caracterizar las vías, como la fue el ancho de carril.

Debe complementarse el equipo existente en el LanammeUCR con un equipo LIDAR móvil, lo que permitirá automatizar y ampliar la capacidad de extracción de datos, así como mejorar la precisión de las estimaciones.

Al aumentar las capacidades de toma de datos mediante un LIDAR móvil, podría incorporarse a los modelos variables como el espaldón, pendientes longitudinales y transversales, estado y presencia de señalamiento vial, así como la zona libre disponible como variable continua, no categórica. Esto permitiría una mayor comprensión del fenómeno estudiado e intervenciones fundamentadas en modelos robustos.

Las variables asociadas al estado funcional y estructural del pavimento deben incorporarse de forma típica en los modelos y análisis, ya que se evidenció su influencia en la accidentabilidad y en general existe información detallada acerca de ellas.

Cabe destacar que el agarre superficial o fricción con la vía es una variable que el LanammeUCR registra para su informe bianual del estado de la red vial nacional pavimentada, sin embargo, para el periodo analizado no se contaba con un registro completo para toda la vía. En caso posible debe incorporarse la variable a futuros modelos, dada la importancia que conlleva un buen agarre superficial entre el neumático y la carretera, variable que incide en las longitudes de frenado y se ve mermada ante las altas precipitaciones del país.

Ante las mejoras en la identificación de sitios de concentración de choques viales que genera el uso del método de exceso de frecuencia de choques con ajuste de Bayes completo sobre las metodologías planteadas por el PIARC (2003) y AASHTO (2010), es trascendental la maximización de la capacidad analítica de los modelos, el aprovechamiento de los recursos tecnológicos que permiten utilizar métodos complejos como las cadenas de Markov Monte Carlo, recopilar de forma ágil la mayor cantidad de variables asociadas a las vías como lo permite el uso de equipos de inventario móvil, así como integrar fenómenos e identificar correlaciones entre las variables y que permitan la mejor estimación de los sitios con mayor accidentabilidad, lo que permitirá destinar los recursos de forma efectiva en mejoras sustanciales en materia de seguridad vial.

Como posibilidad de mejora para futuras investigaciones, es necesario identificar los factores de equivalencia de choque según sus severidades para Costa Rica, ya que una debilidad de la investigación realizada radicó en el uso de factores de equivalencia de México.

Es necesario realizar ampliaciones en la vía que permitan una correcta canalización de los giros, esto mediante carriles de aceleración y desaceleración y carriles de giros, así como la segregación de flujos mediante rutas marginales que permitan ubicar bahías de autobús.

Ante las inconsistencias en la velocidad de operación y velocidad reglamentaria identificadas en la vía, se recomienda a nivel generalizado el uso de delineadores para incentivar reducciones de velocidad en segmentos de riesgo, acompañados de bandas alertadoras en la sección transversal de la vía y bandas rugosas en el espaldón, con el fin de agregar niveles de alerta que eviten o reduzcan la colisión entre vehículos, peatones o ciclistas, postes, árboles, sistema de contención vehicular, entre otros.

Al realizar mejoras en el registro, calidad y amplitud de los datos, se podrán realizar inferencias bayesianas con modelos multivariados y con efecto espacial, considerar el efecto del clima, características detalladas de los usuarios implicados en los choques viales, así como agilizar la generación de modelos de identificación de choques viales en segmentos e intersecciones, junto a funciones de desempeño que permitirán cuantificar la mejora relativa de cada una de las intervenciones, insumo necesario para la planificación vial.

Capítulo 7 . Referencias bibliográficas

- Agüero, J., Lan, B. y Lovegrove, G. (2017). Bayesian Statistics in Transport. Artículo en preparación.
- Agüero, J. (2016). Determinación de rutas con potencial de mejora utilizando funciones de desempeño de seguridad vial: caso de Costa Rica. *Infraestructura Vial*, 18(32), 39-52. San José, Costa Rica.
- Agüero, J. y Pujol, R. (2015). Análisis de choques viales en Costa Rica usando funciones de desempeño de seguridad vial. (Proyecto 321-A9-255). San José, Costa Rica: Universidad de Costa Rica, Programa de Investigación en Desarrollo Urbano Sostenible. San José, Costa Rica.
- Agüero, V. (2013). Full Bayes Poisson gamma, Poisson lognormal, and zero inflated random effects models: Comparing the precision of crash frequency estimates. *Accident Analysis and Prevention*, 50, pg. 289-297.
- Agüero, J. y Jovanis, P. (2008). Analysis of Road Crash Frequency with Spatial Models. *Journal of the Transportation Research Board*, No. 2061, Estados Unidos.
- Agüero, J. y Jovanis, P. (2006). Identifying Road Segments with High Risk of Weather-Related Crashes Using Full Bayesian Hierarchical Models. *TRB Annual Meeting*, Estados Unidos.
- American Association of State Highway and Transportations Officials (AASHTO). (2011). *Roadside Design Guide*, 4th Edition. Washington, D.C., Estados Unidos.
- American Association of State Highway and Transportations Officials (AASHTO). (2010). *Highway Safety Manual*, 1st Edition. Washington, D.C., Estados Unidos.
- Buddhavarapu, P., Banerjee, A. y Prozzi, J. (2013). Influence of pavement condition on horizontal curve safety. *Accident Analysis and Prevention*, 52, pg. 9-18.
- Barrantes, R. y Sanabria, J. (2011). Informe Identificación de zonas de riesgo de choques Rutas 1, 2, 32 y 34., LM-PI-UE-009-11. San José, Costa Rica: Programa Infraestructura del Transporte (PITRA), LanammeUCR. San José, Costa Rica.
- Barnard, G.A. y T. Bayes. (1958). Studies in the history of probability and statistics: IX. Thomas Bayes's essay towards solving a problem in the doctrine of chances. *Biometrika*, Vol. 45, No. 3-4, pg. 293-315.
- Castro, E. y Agüero, J. (2015). Aplicación del método Bayes empírico en análisis de seguridad vial: el caso de la Ruta 32 en Costa Rica. *Revista Ingeniería* 25, pg. 13-33. San José, Costa Rica.

- Consejo de Seguridad Vial (COSEVI), (2014). Estrategia para la implementación de medidas de seguridad vial en espacios de incidencia de choques de tránsito “Una priorización de la atención”.
- Castro, E. y Agüero, J. (2013). Análisis de sitios de concentración de choques viales en la Ruta Nacional 32, utilizando el método de exceso de frecuencia de choques esperado con el ajuste de Bayes empírico. Escuela de Ingeniería Civil. Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.
- Chan, C., Huang, B., Yan, X. y Richards, S. (2010). Investigating effects of asphalts pavement conditions on traffic accidents in Tennessee based on the pavement management system (PMS). *Journal of Advanced Transportation*, 44-3, pg. 123-215.
- Carlin, B. y Thomas, A. (2000). Empirical Bayes: Past, Present and Future. *Journal of the American Statistical Association*, Vol. 95, No. 452, pg. 1286–1289.
- Carlin, B.P. y T.A. Louis. (2000). Bayes and empirical Bayes methods for data analysis. Second Edition, Chapman & Hall/CRC.
- Consejo de Seguridad Vial (COSEVI), (2006). Plan Estratégico Nacional de Seguridad Vial, 2007-2011. San José, Costa Rica.
- Elvik, R., Høy, A., Vaa, T. y Sørensen, M. (2009). The Handbook of Road Safety Measures. 2nd Edition. Emerald Group.
- Guadamuz, R. y Agüero, J. (2017). Bayesian Spatial Models of Crash Frequency at Highway Railway Crossings. Transportation Research Record 2608. TRB, National Research Council, Washington, D.C. pg. 27-35.
- Husain, A. y Chandra, R. (2018). Road Surface and its center line and boundary lines detection using terrestrial Lidar data. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, 21, 363-374.
- Hu, J., Gao, X., Wang, R. y Sun, S. (2017). Research on Comfort and safety Threshold of Pavement Roughness. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2641, pg. 149-155.
- Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC), (2018). Estadísticas Vitales 2017, población, nacimientos, defunciones y matrimonios. Dirección General de Estadísticas y Censos. San José, Costa Rica.

- Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC), (2016). Estadísticas Vitales 2015, población, nacimientos, defunciones y matrimonios. Dirección General de Estadísticas y Censos. San José, Costa Rica.
- Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC), (2014). Estadísticas Vitales 2013, población, nacimientos, defunciones y matrimonios. Dirección General de Estadísticas y Censos. San José, Costa Rica.
- Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC), (2003). Estadísticas Vitales 2000, población, nacimientos, defunciones y matrimonios. Dirección General de Estadísticas y Censos. San José, Costa Rica.
- Jalayer, M. Zhou, H. Gong, J. Hu, S. y Grinter, M. (2014). A Comprehensive Assessment of Highway Inventory Data Collection Methods. *Journal of the Transportation Forum*, Vol. 53, No. 2, pg. 73-92.
- Martin, J.A., Zazo, S., Arranz, J.J., Rodríguez, P. y González, D. (2018). Road safety evaluation through automatic extraction of road horizontal alignments from Mobile LiDAR System and inductive reasoning based on a decision tree. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 146, pg. 334-346.
- Miranda, L.F., Labbe, A. y Fu, L. (2007). Bayesian multiple testing procedures for hotspot identification. *Accident Analysis and Prevention*, 39, pg. 1192-1201.
- National Cooperative Highway Research Program. (2009). Guidance for the design and application of shoulder and centerline rumble strips. Washington DC, EEUU.
- Organización Mundial de la Salud (OMS), (2018a). Reporte del estado del a seguridad vial en el mundo en el 2018. Ginebra, Suiza.
- Organización Mundial de la Salud (OMS), (2018b). Notas descriptivas: Accidentes de tránsito, Datos y cifras. Recuperado de: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/road-traffic-injuries>.
- Peniche, R. (2007). ¿Cuánto cuestan los accidentes de tránsito? Instituto Vial Ibero Americano. Recuperado de: <http://www.institutoivia.com/doc/Cu%C3%A1nto%20cuestan%20los%20accidentes%20de%20tr%C3%A1nsito.%20Por%20el%20Ing.%20Ra%C3%BAl%20Alberto%20Peniche%20Mendoza.pdf>
- Permanent International Association of Road Congresses (PIARC). (2003). Road Safety Manual, 1st Edition. PIARC Technical Committee on Road Safety.

- Lan, B., Persaud, B., Lyon, C. y Bhim, R. (2009). Validation of a Full Bayes methodology for observational before-after road safety studies and application to evaluation of rural signal conversions. Journal of Safety Research. Canada.
- Leiva, M. y Agüero, J. (2016). Análisis de sitios de concentración de choques viales en la Ruta Nacional 2, mediante el método de exceso de frecuencia de choques esperado. Escuela de Ingeniería Civil. Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.
- Park, J., Abdel-Aty, M. y Lee, J. (2016). Use of empirical and full Bayes before after approaches to estimate the safety effects of road side barriers with different crash conditions. Journal of Safety Research. Estados Unidos.
- Ramírez, R. y Valverde, G. (2010). Propuesta para una metodología de análisis de tramos con concentración de choques en las Rutas Nacionales, con base en estudio realizado en la Ruta 1. Escuela de Ingeniería Civil. Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.
- Rodríguez, S. y Valverde, G. (2013). Evaluación de las márgenes de carretera sobre la Ruta Nacional No 32 y diseño de soluciones en materia de seguridad vial. Escuela de Ingeniería Civil. Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.
- Sánchez, L., Agüero, J. y Pujol, R. (2015). Costos de los choques viales en Costa Rica. Programa de Investigación en Desarrollo Urbano Sostenible (ProDUS). Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.
- Segura, L. y Loría, G. (2015). Metodología para la ubicación de los sitios que deben ser intervenidos en razón de que poseen una alta tasa de accidentabilidad y deficiencias en la geometría de la carretera.
- Secretaría de Integración Económica Centroamericana (SIECA). (2014). Manual Centroamericano de Dispositivos Uniformes para el control del tránsito. Ciudad de Guatemala, Guatemala.
- Spiegelhalter, D., Best, N., Carlin, B.P. y Linde, A. (2002). Bayesian Measure of Model Complexity and Fit. Journal of the Royal Statistical Society B. Vol 64, part 4, pp583-639.
- Varela, V. y Agüero, J. (2016). Análisis de sitios de concentración de choques viales en la Ruta Nacional 34 utilizando el método de exceso de frecuencia de choques

esperado con el ajuste de Bayes empírico. Escuela de Ingeniería Civil. Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.

- Valverde, G. (2011). Manual SCV: Guía para el análisis y diseño de seguridad vial de márgenes de carreteras. Vicerrectoría de Investigación, Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.
- Wang, K., Ivan, J., Ravishanker, N. y Jackson, E. (2017). Multivariate poisson lognormal modeling of crashes by type and severity on rural two lane highways. Accident Analysis and Prevention, 99, pg. 6-19.

Anexo

Se adjunta en formato digital la siguiente documentación complementaria:

Anexo 1: Registro de choques viales

Anexo 2: Variables por tramo y segmentos

Anexo 3: Modelo Bayesiano completo en OpenBUGS

Anexo 4: Métodos complementarios para la identificación de sitios de concentración de choques viales